РАСЧЕТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПЕРЕМОТКЕ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Г. К. ЖЕРВЕ

РАСЧЕТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПЕРЕМОТКЕ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

В книге рассматриваются типы обмоток асинхронных двигателей, разбираются достоинства и недостатки каждого из них и указывается путь наиболее целесообразного выбора числа витков и сечения обмотки в зависимости от электрических и магнитных нагрузок в машине. Освещается также вопрос об определении длины, сопротивления и веса обмотки. Изложение иллюстрировано рядом примеров; дается необходимый справочный материал.

Книга предназначена для среднего и младшего технического персонала и для квалифицированных рабочих, занимающихся ремонтом асинхронных двигателей.

Настоящее издание отличается от второго незначительными исправлениями.

Жерве Георгий Константинович
«Расчет асинхронного двигателя при перемотке»

Редактор *Л. Б. Ривлин*
Технический редактор *Е. М. Соболева*

Сдано в произв. 26/III 1959 г. Подп. к печати 5/VIII 1959 г. М-26606. Печ. л. 9,5. Бум. л. 4,75. Уч.-изд. л. 9,3. Бумага $60 \times 92^1/_{16}$. Тираж 25 000. Заказ 251.
Цена 5 р. 65 к.

Типография КОИЗ, Ленинград, Фонтанка, 62

Печать и переплетные работы в типографии № 8 ЛСНХ.

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Задача этой книги — дать доступное руководство по перерасчету асинхронных двигателей широким кругам электротехников, не имеющих специальной подготовки.

Впервые руководство по перерасчету асинхронных двигателей было выпущено Центральным бюро технической информации Министерства электропромышленности СССР в 1948 г. небольшим тиражом и потому не могло удовлетворить своему основному назначению — дойти до широкого потребителя.

В 1951 г. Государственным энергетическим издательством было выпущено первое издание настоящей книги, отличавшееся от издания ЦБТИ тем, что в него были внесены два новых параграфа — по вопросам о двигателях с переключением числа полюсов и о подборе правильного соотношения чисел пазов статора и ротора, а также введены некоторые упрощения в параграфы, касающиеся определения средней длины витка обмотки; несколько изменен порядок чередования параграфов и сокращено количество примеров изоляции обмоток в приложениях за счет исключения второстепенных и мало употребительных.

В настоящем издании по сравнению с предыдущим внесены следующие изменения: взамен таблицы областей применения, нормальных толщин и удельных весов основных изоляционных материалов введен новый параграф, посвященный проводниковым и изоляционным материалам; добавлена таблица номинальных данных асинхронных двигателей единых всесоюзных серий А и АО; пересмотрены приложения, приведены в соответствие с действующими стандартами данные о проводниках круглого и прямоугольного сечений; наконец, весь текст перередактирован, в нужных местах расширен, в частности в отношении численных примеров и схем.

Автор приносит глубокую благодарность инж. Н. Я. Самойлович за ряд ценных указаний по предыдущим изданиям и инж. Б. И. Кузнецову за полезные советы в процессе подготовки данного издания, а также многочисленным читателям предыдущих изданий, приславшим письма с пожеланиями о необходимых исправлениях и дополнениях, которые и были по возможности учтены при подготовке данного издания.

Все замечания по этой книге просьба направлять Ленинградскому отделению Государственного энергетического издательства по адресу: Ленинград, Марсово поле, 1.

ВВЕДЕНИЕ

Асинхронный двигатель трехфазного тока — самая распространенная электрическая машина; благодаря простоте своего устройства, надежности, дешевизне, легкости обслуживания и прекрасным эксплуатационным качествам он вытеснил все остальные виды электродвигателей из большинства областей их применения.

Потребность в асинхронных двигателях очень велика; в них нуждаются все отрасли народного хозяйства. Заводы электропромышленности не могли бы справиться со все возрастающим спросом на асинхронные двигатели, в особенности мелких и средних мощностей, если бы им не приходили на помощь многочисленные электроремонтные мастерские при промышленных предприятиях, электростанциях, РТС, ремесленных училищах и организациях промысловой кооперации, которые занимаются восстановлением и ремонтом пришедшего в негодность электрооборудования.

«Сырья» для этих мастерских всегда достаточно; у каждого потребителя асинхронных двигателей найдутся поврежденные машины, нуждающиеся в ремонте.

В основном — все это двигатели, требующие полной или частичной перемотки, причем нередко при этом выдвигается требование об изменении данных двигателя — перемотке на другое напряжение или число оборотов в минуту. Бывает также, что заводский щиток двигателя утерян, и неизвестно, каковы были его мощность, напряжение, скорость вращения; заказчику же нужен двигатель с вполне определенными данными. Наконец, иногда обмотка вовсе отсутствует, будучи кем-то удалена.

Во всех этих случаях требуется умение произвести расчет ремонтируемого двигателя: определить, какое число витков должна иметь обмотка, каково должно быть сечение обмоточного проводника, какие тип и схему обмотки нужно применить, чтобы двигатель удовлетворял поставленным требованиям. Мало того, когда мощность двигателя неизвестна или когда требуется изменение числа оборотов в минуту против первоначального, нужно уметь подсчитать, что можно требовать от перемотанного двигателя, т. е. какова может получиться его мощность.

В большинстве случаев технологическая сторона перемотки двигателей в ремонтных мастерских бывает поставлена достаточно удовлетворительно, но расчетная — стоит обычно на очень низком

уровне: сечение проводника обмотки определяется «на глазок», количество витков — пробами, сколько поместится в паз; схемы обмоток выполняются более опытными обмотчиками по памяти, зачастую без отчетливого представления о работе обмотки.

Происходит это потому, что методика расчета электрических машин мало доступна широким кругам электротехников из-за отсутствия популярной литературы по этому вопросу; существующая литература по расчету электрических машин предназначена либо для учащихся высших учебных заведений, и тогда она преследует в первую очередь педагогические цели, либо для заводских специалистов-расчетчиков; в этом случае, естественно, подход к расчету приноравливается к заводским условиям, резко отличающимся от условий ремонтных мастерских.

Задачей настоящего руководства как раз и является восполнить этот пробел; в нем изложены только те стороны расчета асинхронного двигателя, которые нормально могут потребоваться при его перемотке при наличии готового сердечника. Поэтому здесь опущены все вопросы, связанные с так называемой «геометрией» машины — профилирование сердечника, выбор наивыгоднейших соотношений основных размеров, законы проектирования серий по определенным серийным признакам и т. д., составляющие ядро работы расчетчика на электромашиностроительном заводе.

Для того чтобы сделать руководство доступным возможно более широким кругам электротехников, изложение построено так, что для его усвоения требуется только знание элементарных основ алгебры и простейших понятий тригонометрии; но зато предполагается, что читатель знаком с устройством и принципом работы асинхронного двигателя и ему известны основные законы и понятия электротехники, в первую очередь понятие о трехфазном переменном токе и вращающемся магнитном поле.

Вопросам технологии обмоток уделено внимание лишь в той степени, в какой они влияют на расчет, так как эти вопросы достаточно полно освещены в многочисленных руководствах по обмоточному делу.

1. Случаи перемотки двигателей

При перемотке асинхронных двигателей могут встретиться следующие типичные случаи.

Случай 1. Обмотка статора частично или полностью повреждена, но остатки ее сохранились настолько, что позволяют определить схему обмотки, ее число витков, шаг и размеры сечения проводника.

Требуется восстановление двигателя с сохранением всех его данных — напряжения, скорости вращения (числа оборотов в минуту) и мощности, указанных в заводском щитке.

В этом случае самым правильным и естественным решением задачи будет восстановление обмотки с сохранением числа витков,

размеров проводника и прочих данных: типа, схемы соединений и т. п.

На первый взгляд может показаться, что ни о каком расчете здесь не может быть и речи. Но в действительности иногда не удается уложить в паз то количество проводников и тех размеров, которые были до перемотки.

Это может происходить либо потому, что при первоначальном изготовлении был применен проводник с более тонкой изоляцией, чем тот, который имеется в наличии, либо изоляция паза была тоньше той, которую приходится ставить; далее, на заводе-изготовителе могли быть применены какие-нибудь приемы или приспособления, недоступные в условиях ремонта, например машинная укладка обмотки. Наконец, может просто не оказаться в наличии проводника нужных размеров. Вследствие этого приходится либо уменьшать число проводников в пазу, либо понижать размеры проводника. Чтобы каждое отступление от первоначальных данных было технически грамотным, оно должно сопровождаться расчетом для проверки его возможных последствий.

Случай 2. Условия те же, что и в предыдущем случае, но требуется перемотать обмотку на новое напряжение с сохранением прочих данных (скорости вращения, мощности и т. д.).

Необходимость расчета здесь очевидна; при перемотке более или менее крупных двигателей низкого напряжения, имеющих очень небольшие числа проводников в пазу, плохо поддающиеся пересчету на новое напряжение, может оказаться необходимым изменить схему обмотки или даже ее тип.

Случай 3. Условия те же, что и в предыдущих случаях, но требуется перемотать машину на новую скорость вращения.

Этот случай требует уже полного перерасчета машины; прежние данные обмотки теряют силу. Мощность машины не сохраняется и вопрос о напряжении отходит на задний план — при полном перерасчете безразлично, на какое напряжение вести новый расчет. Приблизительная величина мощности при новой скорости вращения может быть определена на основании сравнения с мощностью при прежней скорости вращения.

Случай 4. Прежняя обмотка не сохранилась, так что данные ее неизвестны; но заводский щиток на машине имеется.

Требуется восстановить обмотку так, чтобы машина удовлетворяла данным заводского щитка.

По сравнению с предыдущим случаем задача расчета здесь усложняется: требуется найти те соотношения, которые были положены в основу расчета машины при ее изготовлении, что удается далеко не всегда; поэтому нужно заранее оговорить, что прежняя мощность может и не быть достигнута. Решение задачи следует считать удовлетворительным, если новая мощность достигает 85 — 90% от первоначальной.

Случай 5. Условия те же, что и в предыдущем случае, но заводский щиток отсутствует; поэтому данные машины неизвестны.

Очевидно, что этот случай является наиболее сложным. Задача расчета может быть поставлена при нем двояко:

а) требуется рассчитать двигатель на заданную мощность при заданной скорости вращения, т. е. в первую очередь определить, может ли он быть выполнен на эту мощность;

б) требуется определить наибольшую мощность, которая может быть получена от машины при заданной скорости вращения.

Вторая постановка задачи несомненно сложнее первой и точное решение ее невозможно без опытной проверки; только посредством испытания двигателя, выполненного по расчету, может быть окончательно определена его мощность, расчет же дает лишь ее приблизительную величину.

При таком расчете вопрос о напряжении не играет особой роли, поскольку машины мелких и средних мощностей могут быть почти с одинаковым успехом выполнены на любое из применяющихся для них напряжений до 500 *в* включительно, и только в более крупных машинах, при переходе к высоким напряжениям — 3000 и 6000 *в*, значительное усиление изоляции ведет к заметному снижению мощности машины.

Все возможное разнообразие встречающихся на практике случаев не исчерпывается, конечно, перечисленными пятью, но они являются наиболее характерными.

В дальнейшем изложение построено применительно к последнему, наиболее общему и сложному случаю.

Здесь пока совершенно не были упомянуты случаи, когда требуется перемотка не только статорной, но и роторной обмотки; однако из дальнейшего будет видно, что такие случаи не вносят существенного осложнения в ход расчета. Кроме того, двигатели малой и средней мощности все реже встречаются с фазовыми обмотками роторов, могущими требовать перемотки, почти всюду уступая место двигателям с короткозамкнутыми роторами (с «беличьей клеткой»).

2. Определение числа полюсов

Действие трехфазного асинхронного двигателя основано на том, что трехфазный ток, питающий обмотку статора, создает вращающееся магнитное поле; это поле, вращаясь вокруг ротора, наводит в проводниках его обмотки переменные токи, взаимодействие которых с вращающимся полем увлекает ротор в сторону вращения этого поля.

Подобно магнитному полю машины постоянного тока, вращающееся поле может быть двухполюсным, четырехполюсным, шестиполюсным и т. д. или, иначе говоря, иметь одну, две, три и более пар полюсов. Число пар полюсов магнитного поля машины постоянного тока определяется устройством создающей его магнитной системы; точно так же число пар полюсов вращающегося поля полностью определяется устройством создающей его обмотки ста-

тора. Разница между ними состоит только в том, что поле машины постоянного тока создается обмотками, питаемыми постоянным током, и потому неподвижно по отношению к этим обмоткам; вращающееся же поле создается обмотками, питаемыми трехфазным переменным током, и по мере периодического изменения этого тока перемещается относительно обмоток в определенном направлении, обусловленном устройством обмотки и порядком чередования фаз питающего тока. Естественно, что по прошествии одного полного периода изменения тока вращающееся поле оказывается переместившимся так, что картина его распределения в пространстве становится точно такой же, как и в начале этого периода.

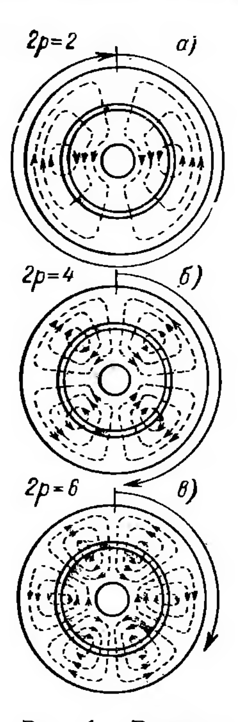


Рис. 1. Вращающиеся поля с различными числами пар полюсов.

На рис. 1, *а, б* и *в* изображены вращающиеся поля с одной, двумя и тремя парами полюсов.

Рядом с ними дугообразными стрелками отмечены те углы, на которые надо повернуть картины этих полей для того, чтобы новое положение по распределению поля ничем не отличалось от исходного. В то время как двухполюсное поле надо повернуть для этой цели на полный оборот, четырехполюсное поле достаточно повернуть только на полоборота, а шестиполюсное—всего лишь на одну треть оборота. Таким образом, при одной и той же частоте питающего тока многополюсное поле вращается в пространстве медленнее двухполюсного в число раз, равное числу пар полюсов.

Если обозначить через f частоту тока, т. е. число полных периодов его изменения за одну секунду, то скорость вращения (или число оборотов в минуту) n_0 двухполюсного поля будет:

$$n_0 = 60f \; [об/мин].$$

В частности, при общепринятом у нас значении частоты $f = 50$ *гц* (периодов в секунду), скорость вращения двухполюсного поля равна:

$$n_0 = 60 \cdot 50 = 3000 \; об/мин.$$

Обозначим число пар полюсов многополюсного поля через p; тогда для его скорости вращения можно будет написать:

$$n_0 = \frac{60f}{p} \; [об/мин]. \qquad (1)$$

При частоте $f = 50$ *гц* скорости вращения многополюсных полей будут:

$p = 2$ (четырехполюсное поле) $n_0 = 1500$ *об/мин*,
$p = 3$ (шестиполюсное поле) $n_0 = 1000$ *об/мин*,
$p = 4$ (восьмиполюсное поле) $n_0 = 750$ *об/мин*

и т. д.

Скорость вращения вращающегося поля носит еще название синхронной скорости

Ротор, увлекаемый полем, не может достигнуть синхронной скорости вращения. В самом деле, если бы это случилось, т. е. если бы ротор и вращающееся поле стали вращаться с одной и той же скоростью, то прекратилось бы всякое движение поля по отношению к ротору, а значит перестали бы наводиться электродвижущие силы, создающие токи в его обмотке; но вместе с ними прекратило бы свое существование механическое взаимодействие последних с вращающимся полем, т. е. та причина, которая заставляет ротор вращаться. Следовательно, ротор неминуемо должен был бы начать отставать от вращающегося поля, как бы проскальзывать в нем; это проскальзывание должно быть тем значительнее, чем труднее ротору вращаться, т. е. чем сильнее он тормозится действующими на него силами, например нагрузкой.

Разность между синхронной скоростью n_0 и действительной скоростью вращения n представляет ту скорость вращения, с которой поле вращается относительно проскальзывающего в нем ротора; отношение этой разности к синхронной скорости называется скольжением; его принято выражать в процентах, для чего это отношение умножается еще на 100:

$$s = 100 \frac{n_0 - n}{n_0} \; [\%]. \qquad (2)$$

Номинальное скольжение, т. е. то скольжение, которое соответствует номинальной мощности двигателя, обозначенной на его заводском щитке, невелико и обычно тем меньше, чем крупнее машина. В небольших двигателях — до 10 *квт* — оно не превосходит 3—5%; в более крупных составляет 1,5—2%, а в очень крупных машинах и еще ниже.

На заводском щитке нормально проставляется действительная номинальная скорость вращения с учетом скольжения, но ввиду малости номинального скольжения всегда нетрудно сообразить, какова синхронная скорость данной машины; так, например, если номинальная скорость вращения 960 *об/мин*, совершенно ясно, что синхронная скорость равна 1000 *об/мин*, т. е. машина имеет три пары полюсов.

Таким образом, ответ на первый вопрос расчета — определение числа пар полюсов по заданной скорости вращения — не представляет никаких затруднений:

$$p = \frac{60f}{n_0} \approx \frac{60f}{n}. \qquad (3)$$

Пример 1. На заводском щитке двигателя указана скорость вращения $n = 730$ *об/мин*. Требуется определить число пар полюсов его обмотки, если частота питающего тока $f = 50$ *гц*.

Согласно формуле (3) для числа пар полюсов p можно написать приближенно:

$$p \approx \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{730} = 4{,}11.$$

Так как число пар полюсов может быть только целым, то ясно, что оно равно здесь

$$p = 4, \ 2p = 8,$$

т. е. машина восьмиполюсная с синхронной скоростью

$$n_0 = \frac{3000}{4} = 750 \text{ об/мин.}$$

и номинальным скольжением

$$s = 100\frac{n_0 - n}{n_0} = 100\frac{750 - 730}{750} = 100 \quad \frac{20}{750} = 2{,}67\%.$$

3. Обмер сердечника

Первой операцией по расчету, вернее по подготовке к расчету, является определение всех необходимых для него размеров активной стали (сердечника) двигателя.

Перед тем как приступить к обмеру, следует тщательно очистить сердечник статора (а если надо, то и ротора) от грязи и масла, остатков старой обмотки и ее изоляции, слоев лака, краски, ржавчины и т. п.; но при этом не следует применять пил даже и с мелкой насечкой; лучше всего пользоваться только тряпкой, смоченной в керосине; в крайнем случае крепко приставшие частицы удаляются шабером. Внутренность пазов удобно протирать веревкой, смоченной в керосине. После очистки сердечник обтирается насухо чистой ветошью.

Измерение каждой величины следует повторять в разных местах, чтобы не впасть в ошибку из-за неправильности одного измерения.

1. Внутренний диаметр статора или, как часто говорят, диаметр его расточки D (рис. 2) является одним из самых важных размеров двигателя; так как от точности его измерения зависит правильность определения других размеров, его нужно производить по возможности тщательнее.

Наилучшим инструментом для этого является внутренний микрометр (микрометрический штихмасс); при его помощи можно измерить диаметр расточки в любом месте.

Обычно такие штихмассы (рис. 3) изготовляются для измерений от 50 до 63 или 70 *мм*; к ним придаются комплекты удлиняющих насадок, позволяющих расширять пределы измерения до нескольких сот миллиметров. Если этого инструмента нет, то для диаметров до 200—250 *мм* можно пользоваться штангенциркулем; однако это не всегда удается, так как зачастую сердечник статора сидит

настолько глубоко в корпусе, что губки штангенциркуля его не захватывают. В таких случаях можно производить измерение посредством обыкновенного штихмасса, изготовленного из куска стальной проволоки; после подгонки такого штихмасса к диаметру расточки длина его измеряется штангенциркулем.

При диаметрах больше 250—300 *мм* можно применять и обыкновенный слесарный кронциркуль с масштабной линейкой, хотя он дает значительно меньшую точность.

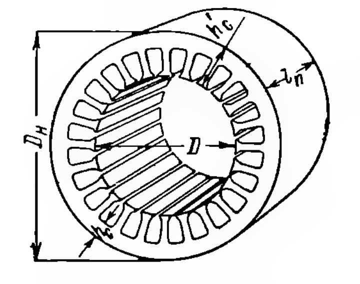


Рис. 2. Основные размеры сердечника статора.

При измерении внутреннего диаметра нужно следить за тем, чтобы оно производилось между серединами двух противоположных зубцов, так

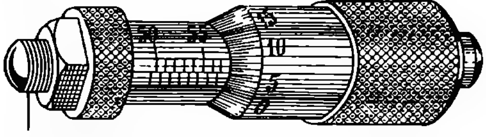


Рис. 3. Микрометрический штихмасс.

как края зубцов могут быть несколько завалены внутрь паза, как это показано на рис. 4.

2. Наружный диаметр статора $D_н$ (рис. 2) не всегда удается измерить непосредственно; измерение осуществляется проще всего, если сердечник статора запрессован в корпус без всякого промежутка между ними, как это обычно делается в закрытых двигателях; тогда можно просто измерить диаметр расточки корпуса. Если же сердечник статора сидит в корпусе на лапках, составляющих часть самого сердечника, или на приливах к корпусу, то измерению могут воспрепятствовать нажимные кольца, сжимающие сердечник; обычно их наружный диаметр примерно равен наружному диаметру статора, но они зачастую сидят на своих местах не вполне точно, с некоторым сдвигом, который препятствует правильному захвату статора губками штангенциркуля. Тогда можно поступить так: вместо измерения диаметра измерить высоту статора вместе с зубцами в направлении радиуса при помощи штангенциркуля, просунув одну из его губок в промежуток между сердечником статора и корпусом, притом так, чтобы сдвинутое нажимное кольцо оказалось в вырезе, которым обычно снабжаются губки штангенциркуля у своего основания (рис. 5). Если обозначить измеренную таким способом толщину статора через h'_c, то наружный диаметр будет равен:

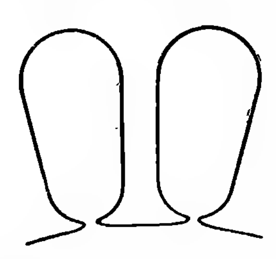


Рис. 4. Завал краев зубцов внутрь пазов.

$$D_н = D + 2h'_c \ [см].$$

3. Высота тела статора h_c (рис. 2) при наличии промежутка между сердечником статора и корпусом измеряется так же, как и величина h'_c (рис. 6). Если же промежутка нет, то она получается вычислением из других величин (см. ниже).

4. Длина сердечника статора в осевом направлении $l_п$ является не очень строго определенной величиной; поэтому ее измерение можно производить как штангенциркулем, так и простой масштабной линейкой. Однако ее никогда не следует измерять по головкам зубцов, потому что зубцы по концам всегда

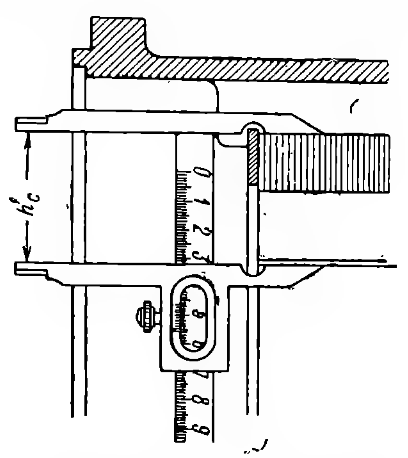


Рис. 5. Измерение толщины статора вместе с зубцами.

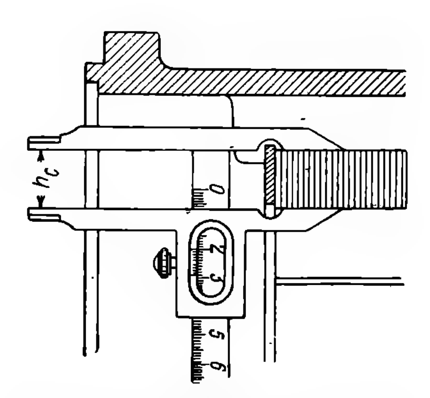


Рис. 6. Измерение высоты тела статора.

несколько расходятся в стороны, образуя так называемый «веер». Правильное значение получается при измерении этой величины по дну паза (рис. 7).

5. Общее число пазов статора Z определяется счетом; оно всегда делится на 3 и обычно четно.

6. Размеры пазов и зубцов статора, подлежащие измерению, зависят от их формы. Различаются пазы: открытые, у которых ширина отверстия равна ширине паза; полузакрытые, имеющие отверстие шириной, меньшей ширины паза, и закрытые, вовсе не имеющие отверстия.

Открытые пазы, характерные для современных более или менее крупных машин, имеют всегда прямоугольную форму и снабжены у отверстия заплечиками для вдвигания клина; измерению в них подлежат: ширина $b_п$, полная глубина $h_п$ и глубина ниже заплечиков (см. рис. 62 к примеру 10).

Полузакрытые пазы значительно разнообразнее по форме; в приложении I дана таблица наиболее часто встречающихся форм полузакрытых пазов с эскизами, на которых указаны те размеры, которые следует измерять. Здесь можно дать только некоторые общие указания к этой наиболее кропотливой части обмера.

а) Способ оттиска: берутся две пластинки из листового свинца толщиной 2—3 *мм* такой величины, чтобы каждая из них могла прикрыть два-три паза; эти пластинки кладутся на торец сердечника по концам какого-либо его диаметра и прикрываются массивной полосой с отверстием в середине. Другая подобная же полоса располагается с противоположной стороны сердечника; через отверстия в обеих полосах пропускается болт, как показано на рис. 8. Затягиванием гайки свинец вжимается в пазы и получается их оттиск, который затем тщательно обмеряется при помощи штангенциркуля с острыми губками или чертежного циркуля-измерителя и десятичного масштаба. Вместо свинца может быть применен мягкий, но не

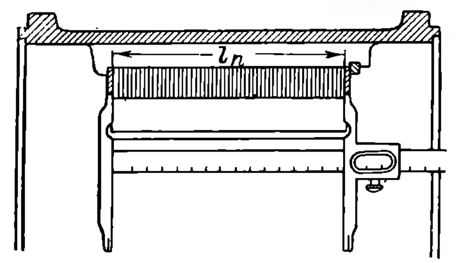


Рис. 7. Измерение осевой длины статора.

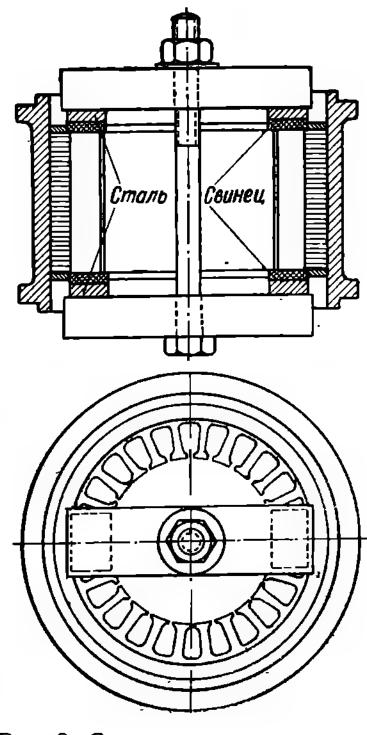


Рис. 8. Снятие оттисков пазов статора.

слоистый картон. Получение оттиска путем удара молотком по свинцовой пластинке через прокладку не рекомендуется, так как оттиск при этом сбивается и получается неточным.

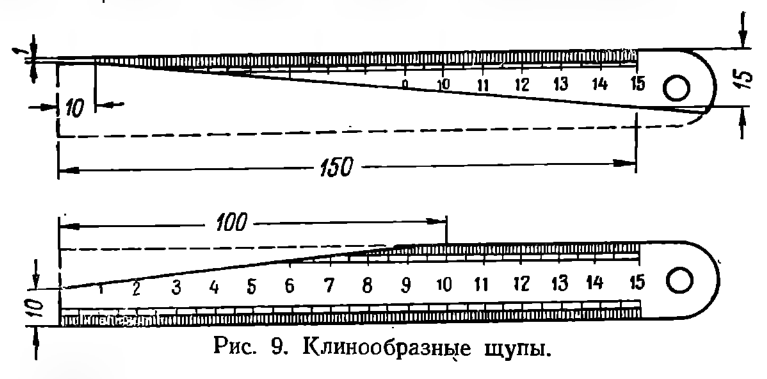


Рис. 9. Клинообразные щупы.

б) Способ клинообразного щупа: две стальные масштабные линейки длиной по 150 *мм* и шириной 20 *мм* срезаются наискось так,

как показано на рис. 9; получаются два клинообразных щупа, один из которых служит для измерения от 1 до 15 *мм*, а другой от 10 до 20 *мм*. Каждому миллиметру длины щупа соответствует увеличение ширины на 0,1 *мм*; вставляя эти щупы в различных местах паза до упора в его стенки и замечая, против какого деления приходятся точки упора, можно с достаточной степенью точности

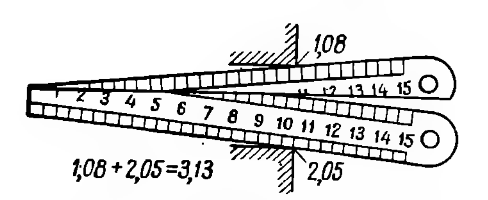


Рис. 10. Измерение посредством двух клинообразных щупов.

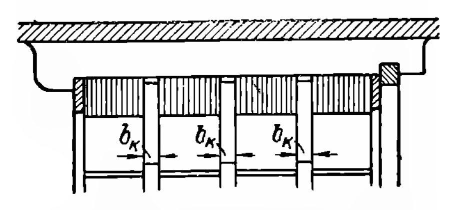


Рис. 11. Поперечные вентиляционные каналы.

произвести все нужные измерения. Мало вероятно встретить паз шире 20 *мм*; что же касается глубины паза, то ее лучше всего измерять при помощи штангенглубиномера или ему подобного инструмента. Для ее измерения можно применять и клинообразные щупы—до 20 *мм* один щуп, свыше 20 *мм*—складывая оба щупа вместе (рис. 10).

Малые радиусы закруглений по углам прямоугольных и трапециевидных пазов достаточно оценивать на глаз.

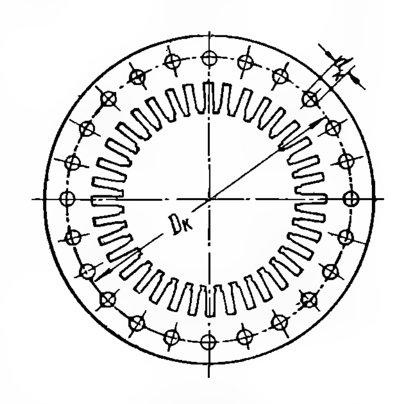
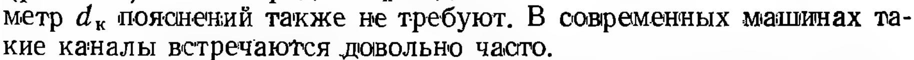


Рис. 12. Продольные вентиляционные каналы.

7. Размеры поперечных вентиляционных каналов (рис. 11): число их $n_к$ и ширина b пояснений не требуют. В современных мелких двигателях такие каналы почти не встречаются.

8. Размеры продольных вентиляционных каналов (рис. 12): число рядов $m_к$ и диаметр $d_к$ пояснений также не требуют. В современных машинах такие каналы встречаются довольно часто.



9. Толщина листов стали Δ обычно встречается либо 0,5 *мм*, либо — реже — 0,35 *мм*; она определяется подсчетом числа листов на какой-нибудь длине, например 10 *мм*. Осторожно отгибая крайние листы в зубцах, следует определить, оклеены ли листы бумагой, или покрыты лаком, или единственной изоляцией между ними является слой естественной окалины, как это большей частью и встречается в современных мелких машинах.

Обмер сердечника ротора требуется производить только в случае перемотки роторов с фазовыми обмотками; при этом обычно достаточно бывает ограничиться определением общего числа пазов Z и их размеров.

Так как такие роторы большей частью имеют пазы простой овальной формы (рис. 5 приложения I), то определение их размеров легко производится посредством штангенциркуля или клинообразных щупов.

Изредка может встретиться необходимость в измерении высоты тела ротора $h_р$ (рис. 13), аналогичной высоте тела статора $h_с$. В большинстве мелких машин ротор насаживается не-

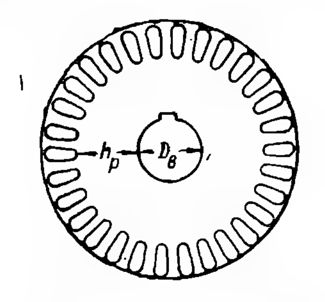


Рис. 13. Высота тела и внутренний диаметр ротора.

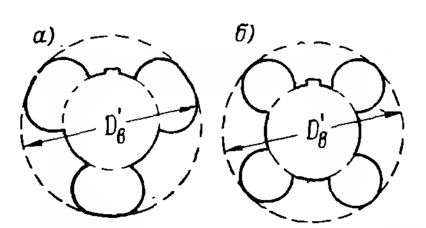


Рис. 14. Фигурные внутренние отверстия ротора.

посредственно на вал, и диаметр последнего $D_в$ является одновременно и внутренним диаметром ротора. Однако в некоторых конструкциях внутреннему отверстию ротора придается форма трилистника или четверолистника (рис. 14, *а* и *б*) с целью создать внутри него продольные вентиляционные каналы. При этом для определения высоты тела ротора за внутренний его диаметр следует принять диаметр окружности $D'_в$, описанной вокруг такого отверстия.

При обмере сердечника ротора необходимо иметь в виду, что его полная длина может иногда несколько отличаться от полной длины сердечника статора $l_п$ не только вследствие неизбежной неточности изготовления, но и преднамеренно, с целью некоторого понижения магнитных нагрузок. Толщина листов в роторе нормально та же, что и в статоре; изоляция листов обычно не применяется.

4. Обработка обмера сердечника

Когда по заданной скорости вращения определено число пар полюсов, которое должна иметь машина, то на основании результатов обмера сердечника можно получить ряд величин, необходимых для расчета.

Все длины, встречающиеся в расчете, выражаются в сантиметрах; между тем результаты обмера обычно бывают выражены в мил-

лиметрах. Поэтому перед началом расчета следует перевести из миллиметров в сантиметры все полученные размеры, кроме размеров пазов. Все площади в процессе расчета выражаются в квадратных сантиметрах, а все объемы — в кубических сантиметрах.

Исключение из этого представляют только размеры, связанные с поперечным сечением проводников: диаметр проводника круглого сечения или стороны проводника прямоугольного сечения выражаются в миллиметрах, а площадь его сечения — в квадратных миллиметрах; поэтому удобно выражать площадь паза также в квадратных миллиметрах.

Первой величиной, очень важной для дальнейшего хода расчета, является так называемое полюсное деление τ. Под ним понимается длина части окружности расточки, приходящейся на долю одного полюса; так как диаметр расточки равен D, а длина ее окружности πD, то полюсное деление равно:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \ [см]. \quad (4)$$

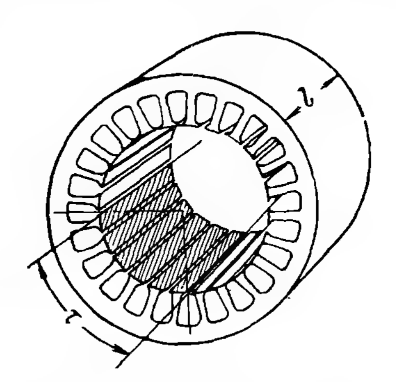


Рис. 15. Площадь полюсного деления.

Полюсное деление представляет длину дуги окружности расточки, на протяжении которой сохраняется полярность каждого полюса вращающегося поля.

При расчетах, связанных с распределением магнитного поля в зазоре, применяется так называемая расчетная длина сердечника l; для ее определения из полной длины $l_п$ вычитается сумма ширин поперечных вентиляционных каналов, если они имеются:

$$l = l_п - n_к b_к \ [см]. \quad (5)$$

Если же поперечные вентиляционные каналы отсутствуют, то расчетная длина принимается равной измеренной полной длине:

$$l = l_п \ [см]. \quad (5а)$$

Площадь, которую занимает один полюс вращающегося поля на внутренней поверхности статора, так называемая площадь поперечного сечения зазора или площадь полюсного деления $Q_в$, принимается равной произведению полюсного деления на расчетную длину (рис. 15):

$$Q_в = \tau l \ [см^2]. \quad (6)$$

Пример 2. Сердечник статора имеет следующие основные размеры.

Внутренний диаметр	$D = 39$ *см*
Полная осевая длина	$l_п = 30$ »
Число вентиляционных каналов	$n_к = 5$
Ширина вентиляционных каналов.	$b_к = 0{,}6$ *см*

Требуется определить площадь полюсного деления $Q_в$, если число полюсов $2p = 6$.

Для этого следует найти полюсное деление τ и расчетную длину l.

Согласно формуле (4),

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 39}{6} = 20,4 \text{ см},$$

а на основании формулы (5)

$$l = l_п - n_к b_к = 30 - 5 \cdot 0,6 = 27,0 \text{ см}.$$

Отсюда искомая величина получается перемножением найденных результатов:

$$Q_в = \tau l = 20,4 \cdot 27,0 \approx 551 \text{ см}^2.$$

Далее может быть вычислена чистая длина активной стали в осевом направлении l_0.

Отдельные листы стали в сердечнике не прилегают друг к другу совершенно плотно даже в том случае, когда никакой изоляции между ними нет; поэтому для получения чистой длины активной стали необходимо не только вычесть из измеренной длины сердечника $l_п$ сумму ширин поперечных вентиляционных каналов (если они имеются), но полученную разность умножить еще на опытный коэффициент заполнения k_0, меньший единицы, учитывающий неплотность прилегания листов друг к другу и зависящий от их толщины и рода изоляции листов:

$$l_0 = k_0 (l_п - n_к b_к) \text{ [см]}, \quad (7)$$

а при отсутствии поперечных вентиляционных каналов:

$$l_0 = k_0 l_п \text{ [см]}. \quad (7а)$$

Значения коэффициента заполнения k_0 могут быть взяты из табл. 1.

Таблица 1

Толщина листов Δ [мм]	Изоляция листов		
	бумага	лак	без изоляции
0,5	0,90	0,93	0,95
0,35	0,87	0,90	0,93

Высота тела статора $h_с$, уже упоминавшаяся ранее, если она не была получена непосредственным измерением, может быть легко вычислена. Если из наружного диаметра статора $D_н$ вычесть внутренний диаметр D и дважды взятую полную глубину паза $h_п$, то половина остатка будет представлять искомую величину:

$$h_с = \frac{1}{2}(D_н - D - 2h_п) \text{ [см]}. \quad (8)$$

Площадь поперечного сечения тела статора, или просто «сечение тела статора» $Q_с$ в том случае, когда в нем

нет продольных вентиляционных каналов, получается как произведение его высоты h_c на чистую длину стали l_0:

$$Q_c = h_c\, l_0 \ [см^2]. \qquad (9)$$

Если же в нем имеется $m_к$ рядов продольных каналов с диаметром $d_к$, то для определения площади его сечения применяется опытная формула:

$$Q_c = \left(h_c - \frac{2}{3}\, m_к d_к\right) l_0 \,[см^2]. \qquad (9a)$$

Пример 3. Требуется определить сечение тела статора для машины из предыдущего примера, если известно, что

Наружный диаметр статора	$D_н = 56$ *см*
Глубина паза	$h_п = 3{,}76$ *см*
Толщина листов	$\Delta = 0{,}5$ *мм*
Изоляция листов	*лак.*

Согласно формуле (7), в которой значение коэффициента заполнения принято по табл. 1 равным $k_0 = 0{,}93$, чистая длина стали равна:

$$l_0 = k_0\,(l_п - h_к b_к) = 0{,}93\,(30 - 5 \cdot 0{,}6) = 25{,}1 \ см.$$

По формуле (8) высота тела статора:

$$h_c = \frac{1}{2}\,(D_н - D - 2h_п) = \frac{56 - 39 - 2 \cdot 3{,}76}{2} = 4{,}74 \ см.$$

Искомое сечение представляет произведение найденных величин:

$$Q_c = h_c l_0 = 4{,}74 \cdot 25{,}1 = 119 \ см^2.$$

Площадь паза $q_п$ в зависимости от его формы определяется по одной из формул таблицы приложения I.

На рис. 2 приложения I представлен паз наиболее сложной формы — трапециевидный с закругленными углами и вершиной. Его площадь определяется как сумма площадей:

а) полуокружности с радиусом r_1;

б) двух четвертей окружности с радиусом r_2;

в) трапеции с высотой h, меньшим основанием $b_1 = 2\,r_1$ и бóльшим основанием $b_2 = 2r_2 + b'_2$;

г) прямоугольника с высотой r_2 и основанием b'_2:

$$q_п = \frac{\pi}{2}\left(r_1^2 + r_2^2\right) + \frac{h}{2}\left(b_1 + b_2\right) + r_2 b'_2 \,[мм^2].$$

Нетрудно убедиться, что все формулы для площадей пазов приложения I являются частными случаями этой формулы.

Вычисление площади паза является необходимым лишь при так называемых «всыпных» обмотках из мягких секций, намотанных на отдельных шаблонах проводником круглого сечения, когда проводники обмотки располагаются в пазу не в определенном порядке, будучи введены в него через его отверстие. Это всегда имеет место при полузакрытых пазах трапециевидной формы, а иногда и при других формах полузакрытых пазов.

Напротив, при открытых и закрытых пазах проводники размещаются в пазу на определенных местах, и вычисление площади паза становится излишним.

Пример 4. Трапециевидный паз со слабо закругленными углами имеет размеры по рис. 16:

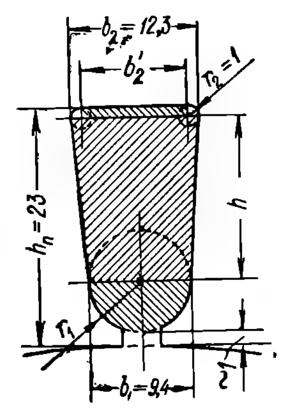


Рис. 16. Пример вычисления площади паза.

Полная глубина	$h_п = 23,0$ *мм*
Ширина у дна	$b_2 = 12,3$ »
Ширина в месте сопряжения прямых сторон с полуокружностью	$b_1 = 9,4$ »
Радиус закругления у дна	$r_2 = 1,0$ »

Требуется определить его площадь $q_п$.

Форма паза соответствует рис. 2 приложения I; для вычисления площади по приведенной там формуле недостает размеров r_1, b'_2 и h.

Первый из них достаточно точно может быть принят равным:

$$r_1 = \frac{b_1}{2} = \frac{9,4}{2} = 4,7 \text{ мм.}$$

Второй равен, очевидно,

$$b'_2 = b_2 - 2r_2 = 12,3 - 2 \quad 1,0 = 10,3 \text{ мм.}$$

Чтобы получить третий размер, следует из полной глубины паза $h_п$ вычесть радиусы r_1 и r_2 и, кроме того, расстояние между дугами окружностей: расточки статора и очертания верхней части паза радиусом r_1. Это расстояние может быть на глаз оценено в 1 *мм*:

$$h = h_п - r_1 - r_2 - 1,0 = 23,0 - 4,7 - 1,0 - 1,0 = 16,3 \text{ мм.}$$

Отсюда площадь паза

$$q_п = \frac{\pi}{2}\left(r_1^2 + r_2^2\right) + \frac{h}{2}\left(b_1 + b_2\right) + r_2 b'_2 =$$

$$= \frac{3,14}{2}(4,7^2 + 1,0^2) + \frac{16,3}{2}(9,4 + 12,3) + 1,0 \cdot 10,3 = 223,6 \text{ мм}^2.$$

Последняя величина, которую может потребоваться получить из обмера сердечника статора, это площадь сечения зубцов, приходящихся на один полюс, или просто **площадь сечения зубцов** $Q_з$.

Ширина зубца $b_з$ вполне определенна, если по всей высоте зубца (или хотя бы в некоторой его части) она остается постоянной, как это бывает в тех случаях, когда стенки двух соседних трапециевидных пазов, примыкающих к зубцу, параллельны. Но если этого нет, то в качестве расчетной ширины зубца может быть принята ширина его на одной трети расстояния между самым узким и самым широким местом зубца, как это представлено на рис. 17.

Обычно из обмера зубцов известна ширина зубца в самом узком месте $b_з'$ и в самом широком $b_з''$; тогда искомая ширина на одной трети расстояния между ними будет равна:

$$b = \frac{1}{2}\left(2b_з' + b_з''\right) \quad [см]. \qquad (10)$$

Сечение одного зубца является произведением ширины зубца $b_з$ на чистую длину стали l_0; если всех зубцов на статоре Z, то на долю одного полюса приходится $\frac{Z}{2p}$ зубцов. Таким образом,

$$Q_з = \frac{Zb_з l_0}{2p} \; [см^2]. \qquad (11)$$

Рис. 17. Определение расчетной ширины зубца

Пример 5. Требуется определить площадь сечения зубцов статора из примера 3, если известно, что

Полное число пазов $Z = 72$

Ширина зубца в наиболее узком месте $b_з' = 0{,}97$ *см*

» » » » широком месте $b_з'' = 1{,}3$ »

На основании формулы (10) расчетная ширина зубца:

$$b_з = \frac{1}{2}\left(2b_з' + b_з''\right) = \frac{2\cdot 0{,}97 + 1{,}3}{3} = 1{,}08 \; см.$$

Тогда по формуле (11) искомое сечение будет равно:

$$Q_з = \frac{Zb_з l_0}{2p} = \frac{72\cdot 1{,}08\cdot 25{,}1}{6} = 326 \; см^2.$$

5. Проводниковые и изоляционные материалы

В статорных обмотках асинхронных двигателей применяются главным образом медные проводники круглого и прямоугольного сечения, причем последние как изолированные, так и голые.

В зависимости от состава изоляции изолированные проводники различаются по маркам, имеющим условные обозначения.

В приложениях III и IV даны таблицы нормальных размеров поперечного сечения проводников круглого и прямоугольного сечений, состав изоляции проводников различных марок с их условными обозначениями и толщины изоляции в зависимости от размеров проводников.

Для статорных обмоток асинхронных двигателей применяется проводник прямоугольного сечения главным образом марки ПБД, иногда ПДА; однако зачастую находит применение и голая прямоугольная медь, которая изолируется при изготовлении обмотки. При круглом сечении наиболее часто применяется марка ПЭЛБО, реже ПБД; в последнее время в небольших машинах нередко применяется проводник марки ПЭЛ; в очень маленьких машинах

(мощностью всего лишь в несколько десятков ватт) иногда встречается проводник марки ПЭЛШО, реже ПШД.

Изоляционные материалы, находящие применение в асинхронных двигателях, многочисленны и разнообразны; их можно классифицировать по различным признакам: по степени гибкости, по форме, по происхождению и т. д.

I. Гибкие изоляционные материалы

А. Листовые материалы

1. Бумага телефонная — бумага обычно серо-коричневого цвета из древесной массы: натуральная, толщиной 0,05 — 0,06 *мм*, или лакированная, главным образом бакелитовым лаком, толщиной 0,07 *мм*; вес 1 $м^2$ натуральной бумаги — 45 *г*, лакированной — 65 *г*.

Применяется для изолировки пазовых частей секций.

2. Бумага кабельная — подобна бумаге телефонной, но имеет толщину: натуральная — 0,12 *мм* и лакированная — 0,13 *мм*, и вес 1 $м^2$: натуральная — 100 *г* и лакированная — 120 *г*.

Применение то же самое.

3. Бумага длинноволокнистая («японская») — тонкая бумага из растительных волокон, которые благодаря особому способу приготовления расположены примерно параллельно; толщина 0,025 *мм*, вес 1 $м^2$ — 15 *г*. Обладает очень высокой прочностью по направлению волокон, но весьма низкой — поперек их.

Применяется для клейки миканита (см. ниже); нарезанная на полосы вдоль волокон может применяться для изоляции отдельных проводников.

4. Бумага оклеечная («динамная») — тонкая бумага из растительных волокон, сильно проклеенная; с одной стороны имеет глянцевитую поверхность, с другой — матовую. Толщина 0,03 *мм*, вес 1 $м^2$ — 20 *г*.

Применяется взамен предыдущей, но уступает ей в прочности. Применение ее по прямому назначению — для оклейки листов электротехнической стали — в настоящее время почти совершенно вышло из употребления.

5. Картон электротехнический («прессшпан») — картон из древесных волокон, от светлого серовато-желтого до оранжево-коричневого цвета, толщиной от 0,1 до 3 *мм*, удельный вес 1,15—1,25.

Находит чрезвычайно широкое применение: при небольших толщинах — для изоляции пазовых частей секций, для выстилания внутренней поверхности пазов, как междувитковая изоляция при применении голой меди и т. д.; при более значительных толщинах — для всякого рода прокладок, распорок и т. п.

Особая разновидность — картон электротехнический лощеный с глянцевой поверхностью, толщиной 0,1—0,15 *мм* — применяется

специально для проходных коробок пазовой изоляции статоров с полузакрытыми пазами с целью облегчения вкладывания сторон мягких проволочных секций через отверстие паза.

6. Картон электротехнический повышенного качества — картон из растительных волокон, подвергнутых особой обработке, обычно от серого до темно-серого цвета, встречается под различными названиями («антивольтон», «ледерпапка» и т. д.). Удельный вес около 1,3. В зависимости от выделки имеет либо матовую шероховатую, либо гладкую глянцевую поверхность. Отличается очень высокой механической прочностью, но в натуральном виде гигроскопичен.

Может применяться наравне с картоном электротехническим, но ввиду значительной дороговизны следует избегать его применения там, где не требуется особой механической прочности.

7. Фибра тонколистовая серая («летероид») — картон из хлопка, обработанного хлористым цинком; толщина 0,1—2,0 *мм*, удельный вес 1,25—1,30.

Благодаря очень высоким механическим качествам применяется для изоляции пазовых частей, в особенности для покрытия гильз из микафолия с целью защиты от повреждений при укладке.

Б. Ткани

1. Ткани хлопчатобумажные — в зависимости от толщины, выделки и плотности носят различные названия — перкаль, миткаль, тафта, вольта, батист, шифон. Применяются главным образом пропитанные лаком, и в этом случае носят название «лакотканей». В зависимости от сорта пропиточного лака различаются: желтая лакоткань («эксцельсиор») при масляном лаке и черная лакоткань («кембрик») при битумно-масляном лаке.

Находят широкое применение для изоляции обмоток всех видов. Обладают отличными изолирующими свойствами, не гигроскопичны, но имеют невысокую механическую прочность, в частности легко прорезываются и продавливаются всякого рода неровностями, например острыми гранями зубцов.

2. Ткани льняные также носят различные названия в зависимости от сорта: парусина, холст, брезент и т. д. Значительно толще, но и много прочнее хлопчатобумажных тканей.

Применяются как в натуральном виде, так и в пропитанном лаками, для второстепенных целей.

3. Ткани шелковые применяются исключительно в виде лакотканей в очень мелких машинах, где при небольшой толщине требуется иметь достаточно хорошую изоляцию; стоимость их значительно выше, чем хлопчатобумажных.

4. Трубки («чулки») хлопчатобумажные и шелковые как натуральные, так и пропитанные масляным лаком, применяются в небольших машинах для изоляции различных соединений. Зача-

стую окрашиваются в яркие цвета, например для распознавания начал и концов секций.

5. Лента лакированная («лаколента») представляет собой либо лакоткань, нарезанную на полосы по диагонали плетения, либо специальную ленту, пропитанную масляным лаком, шириной от 10 до 40 *мм.*

Находит обширное применение для изоляции пазовых и лобовых частей секций, всякого рода соединений и т. п.

6. Лента хлопчатобумажная различается по толщине и способу тканья; выпускается шириной от 10 до 40 *мм.*

Лента батистовая имеет толщину 0,12 *мм*; применяется для изоляции главным образом отдельных витков в пазовой и лобовой частях.

Лента миткалевая толщиной 0,15 *мм* применяется для тех же целей.

Лента тафтяная толщиной 0,18 *мм* применяется наравне с предыдущей в несколько более крупных машинах.

Лента киперная, диагонального плетения, толщина которой достигает 0,4 *мм*, применяется для наиболее грубых покровных слоев изоляции; представляет собой очень прочный материал.

7. Лента стеклянная («стеклолента») представляет плетение из чистой стеклянной пряжи; ее механическая прочность и теплостойкость очень высоки; толщина обычно составляет 0,1—0,2 *мм.*

С успехом применяется вместо лаколенты для изоляции секций, однако при непременном условии пропитки теплостойкими лаками, причем существенно важно, чтобы лак хорошо сцеплялся со стеклянным волокном, так как в противном случае стеклянная пряжа с течением времени расползается.

В. Гибкие изделия из слюды

1. Миканит гибкий — щипаная слюда, клееная лаком в листы толщиной от 0,15 до 0,5 *мм;* при температуре 100—150°C размягчается и приобретает достаточную гибкость. Удельный вес 1,9.

Применяется для гильзовой изоляции секций в пазовой части.

2. Микафолий («микалист») — щипаная слюда, клееная лаком на основу из бумаги в один, два и три слоя. Толщина от 0,12 до 0,25 *мм* и выше, удельный вес 1,4.

Применяется для изоляции секций в пазовой части и прокладок между витками секций, намотанных из голой меди, гнутой на низкое ребро.

3. Микалента — щипаная слюда, клееная лаком в один слой на основу из длинноволокнистой бумаги; толщина нормально 0,13—0,17 *мм,* удельный вес 1,5—1,6.

Применяется для изоляции секций в пазовой и лобовой частях.

Г Органические пленки

1. Ацетил-целлюлоза — прозрачная бесцветная пленка из древесной клетчатки, подвергнутой особой обработке; напоминает целлулоид, но отличается от него тем, что очень плохо горит; является одним из наиболее теплопроводных изоляционных материалов. Удельный вес 1,2—1,25.

Применяется в виде ленты (так называемая «синтолента») для изоляции пазовых и лобовых частей секций.

2. Трихлорацетат — прозрачная пленка от светло-голубого до темно-синего цвета, представляющая дальнейшее усовершенствование ацетил-целлюлозы в направлении повышения механической и электрической прочности.

Применение то же.

Общим свойством всех синтетических пленок является то, что надорвать их от чистообрезанного края или прорвать в середине очень трудно; но будучи надорваны, они дальше рвутся без всякого труда. Это обстоятельство вынуждает защищать изоляцию из пленок покрывными слоями механически прочных материалов, что сильно препятствует применению пленок.

II. Твердые изоляционные материалы

А. Твердые материалы органического происхождения

1. Дерево различных пород находит широкое применение для всякого рода распорок, прокладок и клиньев. Особенно пригоден белый бук, так как он достаточно прочен, не склонен колоться и легко обрабатывается. Для того чтобы изделия из дерева не усыхали, они должны тщательно просушиваться и пропитываться в льняном масле.

2. Гетинакс представляет собой бумагу, лакированную бакелитовым лаком и спрессованную под значительным давлением при температуре запекания лака. Выпускается в виде пластин различной толщины — от 0,5 до 50 *мм*. Удельный вес 1,3—1,4. Прекрасно поддается всевозможной механической обработке, прочен, мало гигроскопичен и не горюч, но способен колоться вдоль слоев бумаги. Обладает очень хорошими изолирующими качествами, в особенности если после механической обработки отлакирован бакелитовым лаком и запечен. Превосходный материал для клиньев, закрывающих пазы якоря, всевозможных распорок, досок зажимов и т. д. По сравнению с деревом обладает тем преимуществом, что не усыхает.

3. Текстолит отличается от гетинакса тем, что спрессован не из бумаги, а из хлопчатобумажной или льняной ткани. Удельный вес 1,3—1,35. Прочностью превосходит гетинакс и обладает значительно меньшей склонностью колоться вдоль слоев. При механической обработке дает ворсистую поверхность, поэтому нуж-

дается в последующей шлифовке. В остальном подобен гетинаксу и имеет ту же область применения, но стоит значительно дороже.

4. Фибра представляет собой вулканизированную и сильно спрессованную клетчатку; выпускается в виде досок, листов разной толщины, стержней и т. д. Удельный вес 1,25, цвет обычно грязно-красный, реже серый или желтовато-серый. Теплостойкость, изолирующие свойства, обрабатываемость и механическая прочность хороши, но значительная гигроскопичность и сильное коробление при отсыревании являются крупными недостатками.

Применяется для изготовления клиньев, разного рода распорок, досок зажимов, различных втулок и шайб.

5. Эбонит (вулканизированный каучук) выпускается в виде листов, досок, стержней и т. д. Удельный вес 1,15—1,3, цвет черный или темно-коричневый. При нагревании сначала размягчается, затем плавится, но горит плохо. Очень хорошо принимает всякую механическую обработку, в том числе полировку; но механическая прочность низкая.

Может применяться в тех местах, где не ожидаются значительные нагревы, в частности для досок зажимов.

6. Пластические массы в настоящее время получили чрезвычайно широкое развитие и крайне разнообразны по своим физическим и механическим свойствам; находят применение для прессованных досок зажимов, разного рода распорок и т. п.

Б. Твердые материалы неорганического происхождения

1. Асбоцемент — масса из асбестового волокна, связанного цементом, светло-серого цвета. Удельный вес 1,6. Выпускается в виде досок разной толщины, а также фасонных деталей.

Может быть допущен для изготовления досок зажимов и различных распорок, но для этой цели должен быть пропитан асфальтовым лаком.

2. Натуральные камни — мрамор, шифер и т. д. — могут быть применены только для досок зажимов.

3. Миканит твердый — щипаная слюда, клеенная с небольшим количеством лака. Мало размягчается при нагревании; удельный вес 2,0.

Может иметь ограниченное применение для прокладок между слоями обмотки в пазу и разного рода шайб.

6. Типы статорных обмоток

Характерной величиной, определяющей устройство обмотки статора, а иногда и влияющей на выбор ее типа, является так называемое число пазов на полюс и фазу q, которое получается путем деления общего числа пазов Z на число фаз и число полюсов:

$$q = \frac{Z}{3 \cdot 2p} = \frac{Z}{6p}. \quad (12)$$

Результат деления не всегда бывает целым числом; он может получаться и дробным.

В первом случае проводники каждой фазы на каждом полюсном делении занимают объем, соответствующий q пазам; наоборот, при дробных значениях q на различных полюсных делениях проводники данной фазы в большинстве случаев занимают различные объемы.

Не при всяких дробных значениях q возможно выполнение обмоток, симметричных по отношению ко всем фазам; так, если знаменатель дроби получается равным или кратным трем, невозможно получить симметричную обмотку. Следует избегать применения несимметричных обмоток, в которых проводники разных фаз распределены по окружности статора не одинаковым образом, так как машины с такими обмотками (в особенности небольшие) могут работать очень плохо: обладать низким пусковым моментом, отличаться гудением, легко перегреваться и т. д.

Так, например, при общем числе пазов $Z = 48$ нельзя выполнить симметричную обмотку для шестиполюсной машины, так как число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{Z}{3 \cdot 2p} = \frac{48}{3 \cdot 6} = 2^2/_3$$

имеет знаменатель, равный трем.

Всякая обмотка должна быть выполнена так, чтобы ток во всех проводниках, принадлежащих к какой-нибудь фазе и лежащих на одном и том же полюсном делении, имел одно и то же направление, а на соседнем полюсном делении — противоположное. Чередование пазов, занятых проводниками разных фаз, должно происходить в одном и том же порядке по всей окружности статора.

Все виды обмоток могут быть выполнены при последовательном соединении всех проводников каждой фазы; но в большинстве случаев возможно и параллельное соединение двух или более групп проводников при условии, что группы эти совершенно одинаковы как по числу, так и по расположению проводников. Число возможных параллельных групп проводников, или, как говорят, параллельных ветвей обмотки a, зависит от числа полюсов и типа обмотки.

Существует довольно большое количество различных типов обмоток; но практически в асинхронных двигателях малой и средней мощности находят применение только три типа: однослойная катушечная, двухслойная и однослойная цепная.

Каждый из них отличается своими особенностями, условиями выполнимости, достоинствами и недостатками, которые следует учитывать при выборе типа обмотки.

Однослойная катушечная обмотка (рис. 18) хотя и является в настоящее время уже устаревшей, но все еще встречается довольно часто. Она характеризуется тем, что в каждой фазе на каждую пару полюсных делений имеется группа катушек или секций с одинаковыми числами витков, но неодинаковой

формы; они концентрически охватывают друг друга так, что внутренние имеют меньшую ширину, а наружные — бо́льшую. Лобовые части соседних групп секций, принадлежащих к разным фазам, неодинаковы; они располагаются в два, реже в три яруса.

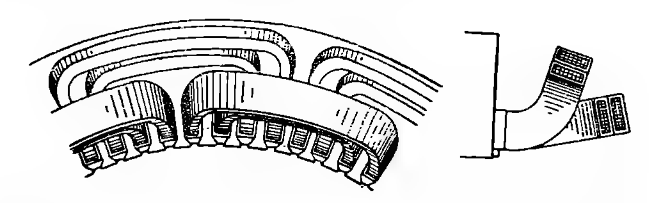


Рис. 18. Однослойная двухъярусная катушечная обмотка.

На рис. 19 представлена в развернутом виде схема катушечной обмотки с расположением лобовых частей в двух ярусах для четырехполюсной машины с числом пазов на полюс и фазу $q = 3$. Для ясности секции разных фаз изображены различными линиями;

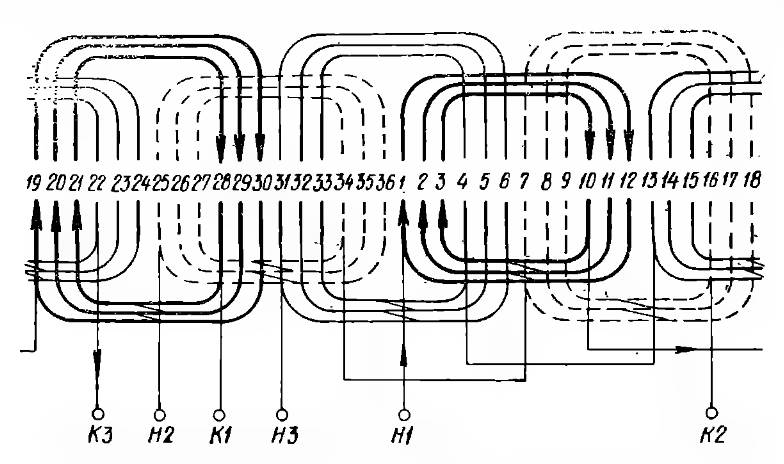


Рис. 19. Схема катушечной обмотки для четырехполюсной машины с 3 пазами на полюс и фазу.

на одной из фаз стрелками нанесены направления обхода от начала этой фазы к концу. Нетрудно убедиться, что обмотка вполне симметрична относительно всех трех фаз; каждая фаза содержит по одной группе секций первого яруса (более короткие лобовые части) и второго яруса (более длинные лобовые части), причем обе группы соединены друг с другом последовательно. Параллельное соединение этих групп было бы нецелесообразно, потому что вследствие неодинаковости размеров и формы лобовых частей их активные и индуктивные сопротивления неодинаковы, а это способствует неравномерному распределению тока между ними.

Далее, на рис. 20 представлена катушечная обмотка с тем же общим числом пазов $Z = 36$, но выполненная для шестиполюсной

машины с числом пазов на полюс и фазу $q = 2$. Здесь в состав каждой фазы входит уже по три группы секций, причем они неодинаково распределены между ярусами; в одной фазе содержатся две группы первого яруса и одна группа второго, в другой — наоборот, одна первого и две второго; что касается третьей фазы, то на нее приходится только по одной группе в каждом ярусе; третья же группа имеет переходную форму, одной стороной принадлежащую к первому ярусу, а другой — ко второму. Очевидно, что наличие такой переходной или «кривой» группы будет иметь место при всяком нечетном числе пар полюсов.

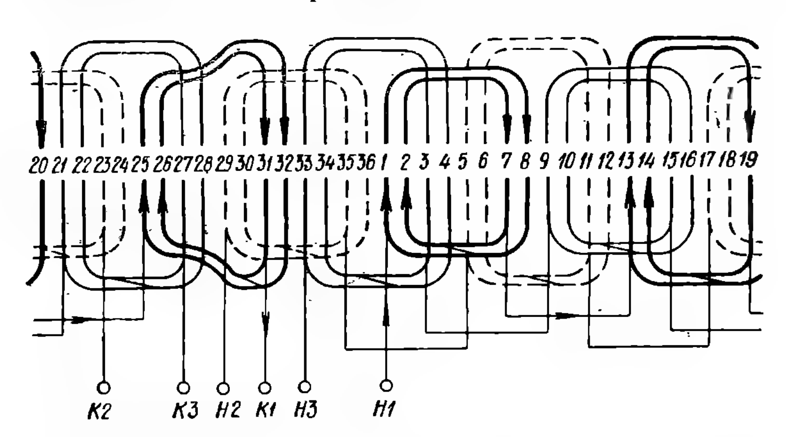


Рис. 20. Схема катушечной обмотки для шестиполюсной машины с 2 пазами на полюс и фазу.

Как и в предыдущем случае, единственным целесообразным соединением групп между собой является последовательное.

Наконец, на рис. 21 изображена однослойная обмотка с тем же общим числом пазов $Z = 36$, но выполненная для восьмиполюсной машины с дробным числом пазов на полюс и фазу $q = 1^1/_2$. Эта обмотка состоит из неодинаковых групп секций; в каждой фазе содержится по две группы из двух секций и по две одиночных секции, причем они чередуются между собой.

Лобовые части всех групп из двух секций лежат в одном ярусе, а всех одиночных секций — в другом. В отличие от предыдущих случаев здесь имеется возможность соединить обмотку каждой фазы в две параллельные ветви, каждая из которых содержит по одной группе из двух секций и одной одиночной секции.

На этих трех примерах достаточно ясно видны условия выполнимости двухъярусной катушечной обмотки. Прежде всего общее число пазов Z должно быть четным; а так как для всякой трехфазной обмотки оно должно быть еще и кратно трем, то первым условием является делимость его на 6. Для того чтобы число пазов на полюс и фазу получилось целым, нужно, чтобы частное от этого деления в свою очередь делилось на число полюсов; все остальные

общие числа пазов дают дробные числа пазов на полюс и фазу. При этом все дробные числа пазов на полюс и фазу дают в принципе симметричные обмотки, кроме имеющих знаменатели кратные трем; но практически, если пытаться выполнить обмотку с таким дробным числом, у которого знаменатель больше двух, то это приводит к очень сложной форме обмотки: почти все секции получаются разных размеров, что очень осложняет их выполнение. Что касается числа параллельных ветвей, то при условии полной одинаковости последних они возможны не для всех чисел пар полюсов, а только для четных; половина числа пар полюсов и представляет число возможных вполне одинаковых параллельных ветвей.

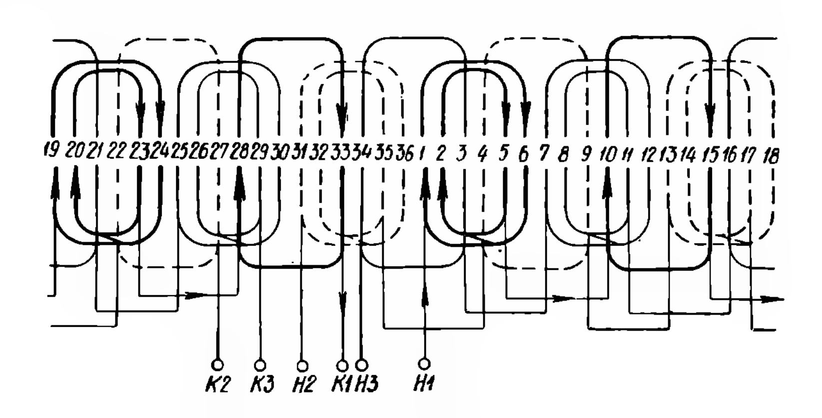


Рис. 21. Схема катушечной обмотки для восьмиполюсной машины с $1^1/_2$ пазами на полюс и фазу.

В приложении II дана таблица выполнимых чисел пазов на полюс и фазу для трехфазных обмоток, составленная для общих чисел пазов до 120 и чисел полюсов до 12. Звездочкой отмечены наиболее употребительные числа пазов; нетрудно убедиться, что это как раз те, которые дают выполнимые обмотки при наибольшем количестве разных чисел полюсов.

Однослойные катушечные обмотки с расположением лобовых частей в трех ярусах применяются почти исключительно в двухполюсных машинах, в которых двухъярусное расположение очень неудобно, так как при нем все секции имеют разные размеры и форму.

На рис. 22 представлена двухполюсная трехъярусная обмотка с тем же общим числом пазов $Z = 36$. Особенностью этой обмотки является то, что в ней каждая группа секций каждой фазы разделена на две половины, причем лобовые части их отогнуты в разные стороны. Так как обе половины совершенно одинаковы, их можно соединять друг с другом не только последовательно, но и параллельно.

Достоинством катушечной обмотки является то, что она может быть применена в машинах с закрытыми пазами статора, а также когда отверстие полузакрытого паза недостаточно велико для прохода проводников. Если секции состоят из большого числа витков относительно тонкого проводника, то обмотка выполняется на самой машине по так называемому способу прошивания, при котором проводник продевается через пазы столько раз, сколько витков в секции, и лобовые части формуются на специальных подкладных шаблонах.

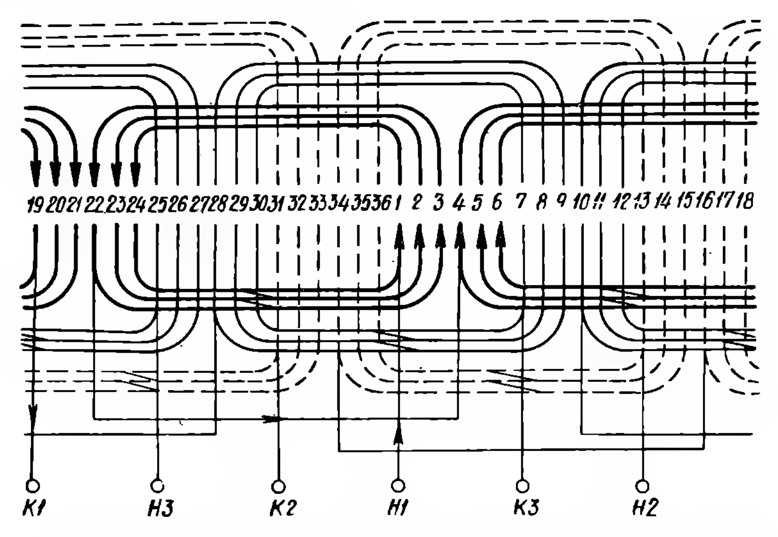


Рис. 22. Схема катушечной обмотки для двухполюсной машины с 6 пазами на полюс и фазу, с расположением лобовых частей в трех ярусах.

Если же число витков в секции невелико, а сечение проводника значительно, в особенности когда применяется проводник прямоугольного сечения, то выполнение обмотки производится по способу разрезных секций; каждая секция изготовляется отдельно от машины и имеет одну отформованную лобовую часть и окончательно изолированные пазовые части (рис. 23). Такие секции вдвигаются в пазы сбоку с разных сторон машины, после чего производится формование второй лобовой части на подкладном шаблоне посредством поочередного соединения выступающих концов проводников.

Оба эти способа требуют большой затраты времени, и потому прибегать к ним можно только в крайних случаях, когда обмотка не может быть выполнена никаким иным способом. Другим их недостатком является плохое использование площади паза вследствие необходимости иметь достаточно большой зазор для прошивания или для вдвигания секций в пазы.

Применение катушечной обмотки *нецелесообразно* в тех случаях, когда обмотка может быть вложена через отверстия

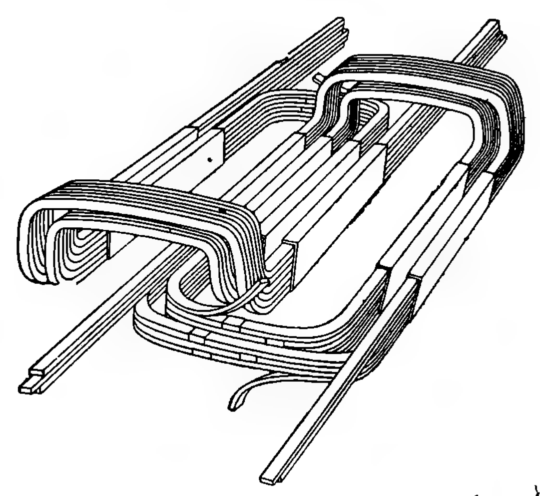


Рис. 23. Разрезные секции катушечной обмотки.

пазов, так как для изготовления секций нужно применять число шаблонов разной формы, равное удвоенному числу пазов на полюс и фазу.

Двухслойная обмотка обладает прежде всего тем преимуществом, что все ее секции совершенно одинаковы и потому могут быть изготовлены на одном шаблоне.

Рис. 24. Мягкая секция двухслойной обмотки.

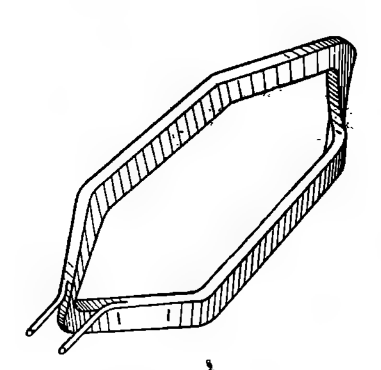


Рис. 25. Жесткая секция двухслойной обмотки.

Если секция изготовляется из проволоки небольшого диаметра и предназначается для так называемого «всыпания» в полузакры-

тый паз, то ей придается форма трапеции с закругленными углами (рис. 24); лобовые части формуются после укладки секций в пазы. Такие секции носят название «мягких».

Если же сечение проводника велико (в особенности, когда оно имеет прямоугольную форму), а секции предназначаются для укладки в открытые пазы, им заранее придается окончательная форма в виде шестиугольника с отформованными лобовыми частями (рис. 25); при этом они изолируются сразу при изготовлении. Такие секции называются «жесткими».

В обоих случаях секции укладываются в пазы в два слоя так, что одна сторона каждой секции лежит на дне паза (в нижнем слое), а другая — непосредственно под клином, закрывающим паз (в верхнем слое), как это показано на рис. 26.

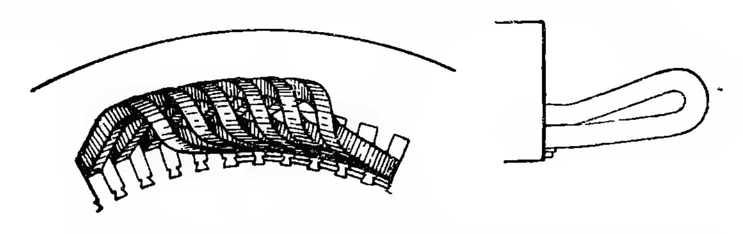


Рис. 26. Укладка жестких секций двухслойной обмотки.

Вторым преимуществом этой обмотки является то, что она выполняется при любых общих числах пазов, кратных трем, как четных, так и нечетных, кроме тех, при которых знаменатель дробного числа пазов на полюс и фазу кратен трем. Все выполнимые числа пазов на полюс и фазу сведены в таблицу приложения II.

Третьим преимуществом является то, что число параллельных ветвей при любом целом числе пазов на полюс и фазу может быть равно числу полюсов, так как обмотка имеет столько же вполне одинаковых групп секций. При дробных числах пазов на полюс и фазу число возможных параллельных ветвей равно частному от деления числа полюсов на знаменатель дроби; так что, например, при знаменателе, равном 2 (очень распространенный случай), число параллельных ветвей может быть равно числу пар полюсов.

Наконец, четвертое преимущество двухслойных обмоток состоит в том, что ширина секции, а вместе с ней длина и осевой вылет лобовых частей могут быть изменены в широких пределах за счет так называемого шага обмотки.

Под шагом обмотки y понимается число зубцов сердечника, охватываемых секцией. Если оно равно числу пазов на один полюс, или $y = 3q$, то шаг называется диаметральным; если же оно меньше этого числа, шаг называется укороченным. В некоторых случаях приходится прибегать и к удлиненному шагу. Только обмотки с целыми числами пазов на полюс и фазу могут

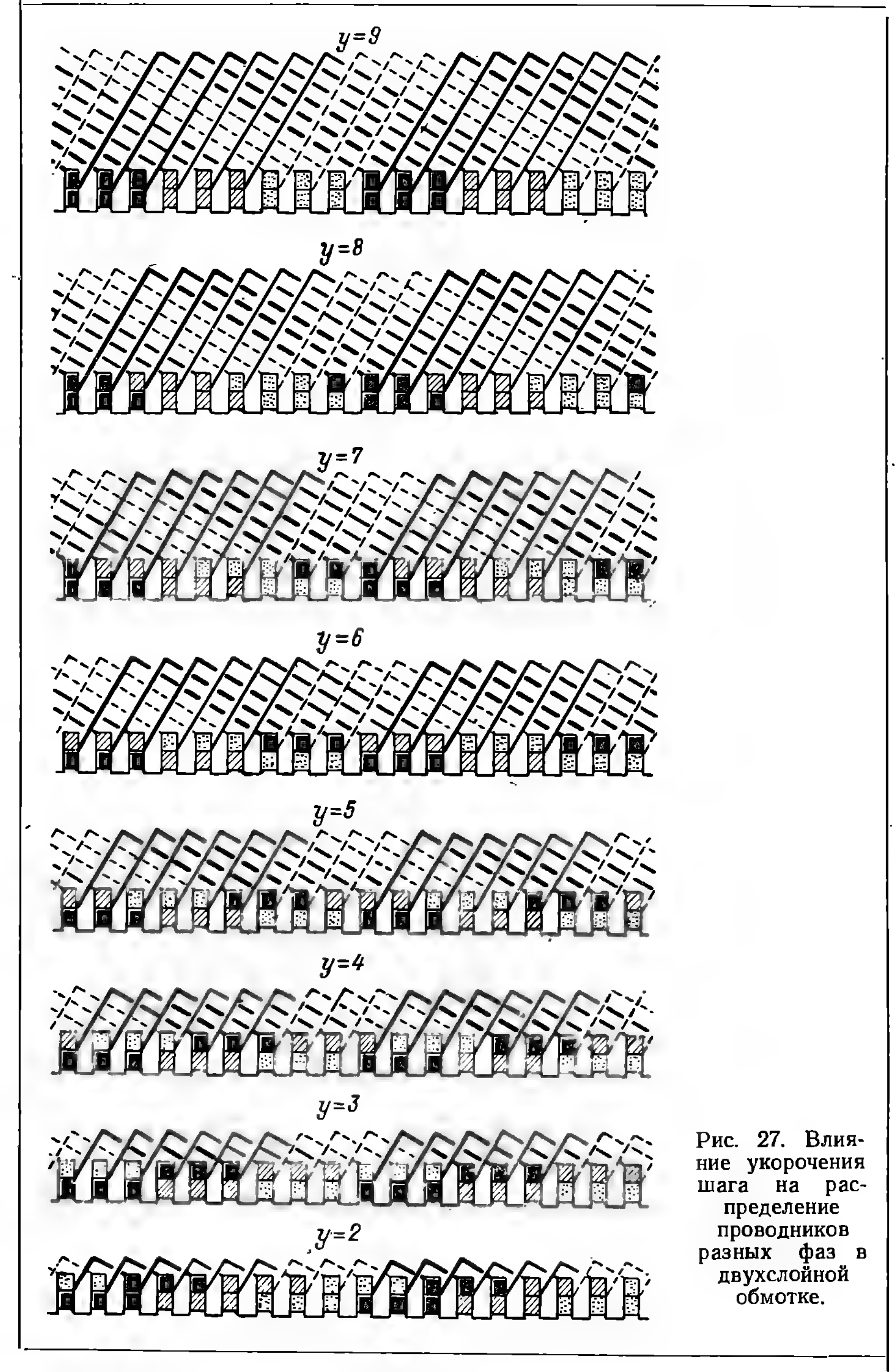


Рис. 27. Влияние укорочения шага на распределение проводников разных фаз в двухслойной обмотке.

иметь секции с диаметральным шагом; все обмотки с дробными числами пазов на полюс и фазу имеют секции с более или менее укороченным (или удлиненным) шагом.

Для ясного представления о том, что происходит при укорочении шага на рис. 27 схематически изображен ряд обмоток с одним и тем же числом пазов на полюс и фазу, но с различной величиной шага. Из этого рисунка видно, что только при диаметральном шаге каждый паз заполнен сторонами секций лишь одной какой-нибудь фазы; как только шаг начинает укорачиваться, сейчас же появляются пазы, содержащие стороны секций разных фаз. Чем короче шаг, тем больше таких пазов, и при шаге $y = 2q$ уже все пазы со-

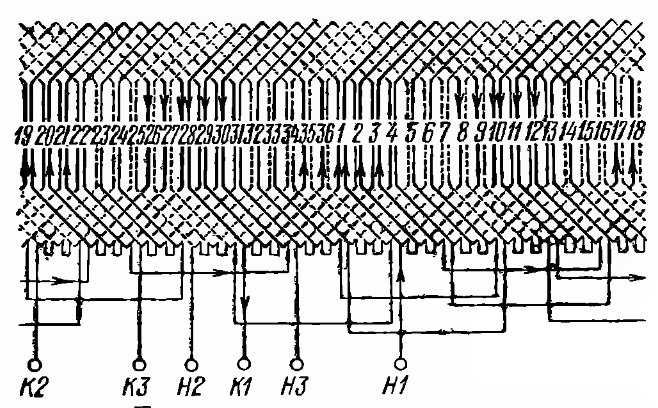


Рис. 28. Схема двухслойной обмотки с укороченным шагом для четырехполюсной машины с 3 пазами на полюс и фазу.

держат стороны секций, принадлежащие разным фазам; так продолжается до тех пор, пока шаг не примет значение $y = q$.

Дальнейшее укорочение шага бессмысленно, так как начнут появляться пазы, содержащие стороны секций хотя и одной и той же фазы, но направленные противоположно, так что действие токов этих сторон будет взаимно нейтрализоваться. Практически обычно применяется укорочение шага примерно до величины

$$y \approx 0{,}8 \cdot 3q = 2{,}4q \qquad (13)$$

или ближайшего к ней целого значения (шаг может быть только целым числом!).

Только в некоторых специальных случаях приходится применять более короткий или более длинный шаг.

Очень часто говорят про обмотку с шагом y, что она имеет шаг из первого паза в $(y + 1)$-й паз; так, например, если $y = 8$, то это соответствует шагу из первого паза в девятый.

Для примера на рис. 28 дана схема двухслойной обмотки с тем же общим числом пазов $Z = 36$, что и все предыдущие схемы, выполненная для четырехполюсной машины с тремя пазами на полюс

и фазу при последовательном соединении всех секций в одной фазе. Шаг этой обмотки взят $y = 7$.

На рис. 29 представлена схема двухслойной обмотки для шестиполюсной машины с двумя пазами на полюс и фазу и с шагом $y = 5$.

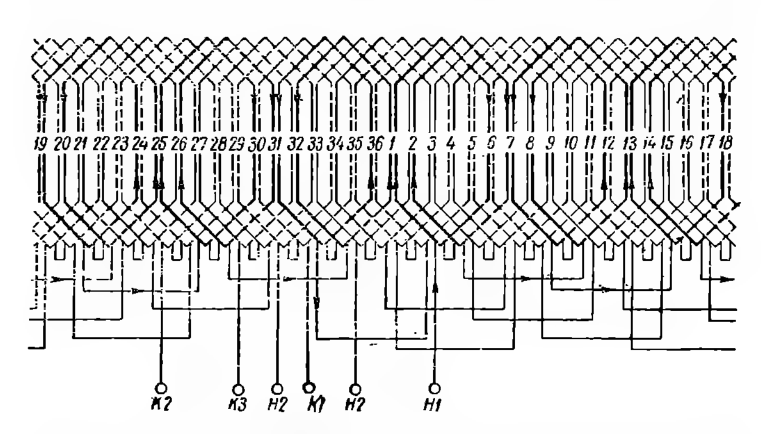


Рис. 29. Схема двухслойной обмотки с укороченным шагом для шестиполюсной машины с 2 пазами на полюс и фазу.

Наконец, на рис. 30 показан пример двухслойной обмотки для восьмиполюсной машины с дробным числом пазов на полюс и фазу $q = 1^1/_2$ и с шагом $y = 4$.

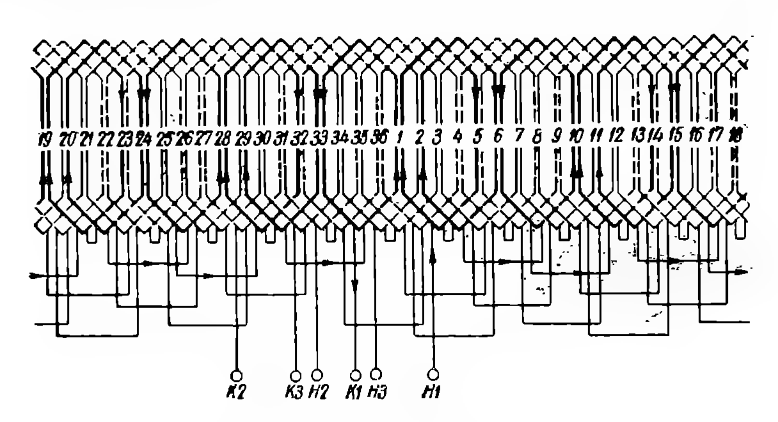


Рис. 30. Схема двухслойной обмотки с укороченным шагом для восьмиполюсной машины с $1^1/_2$ пазами на полюс и фазу.

Достоинства двухслойной обмотки привели к тому, что она почти совершенно вытеснила прочие типы статорных обмоток, применяемых в машинах переменного тока всех видов. Однако эта обмотка не лишена и некоторых недостатков.

Первым из них является то, что количество секций в ней в два раза больше, чем во всех других типах обмоток: оно равно общему

числу пазов Z, в то время как в прочих обмотках оно составляет только $^1/_2\ Z$. Это удорожает изготовление и укладку обмотки.

Вторым недостатком двухслойной обмотки, сильнее всего ощущаемым в мелких двигателях, является то, что часть объема паза занимается междуслойной изоляцией, необходимой уже по одному тому, что в часть пазов попадают стороны секций разных фаз, да и между сторонами секций одной и той же фазы может быть значительное напряжение.

К недостаткам двухслойной обмотки нужно отнести и неудобства при начале и окончании укладки секций. Действительно, при укладке первой секции одна сторона ее ложится на свое постоян-

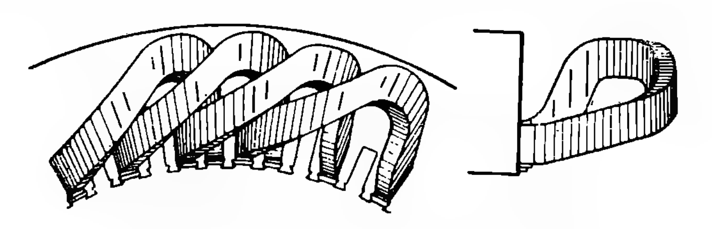


Рис. 31. Укладка секций цепной обмотки.

ное место в нижнем слое, т. е. на дне паза, другая же должна лечь в верхний слой поверх стороны какой-то секции, которая будет уложена только при окончании укладки, когда обмотка обойдет всю окружность, но которой пока еще нет. Поэтому вторая сторона первой секции остается не уложенный в паз.

То же самое имеет место в отношении второй, третьей и т. д. секций; только когда будет укладываться $(y+1)$-я секция, ее вторая сторона попадет в верхний слой паза, нижний слой которого уже занят стороной первой секции. Таким образом, первые y секций остаются уложенными только одной стороной до самого конца укладки. Наибольшие затруднения начинаются тогда, когда укладка обойдет всю окружность статора и для окончания обмотки нужно будет последние y секций подсовывать под первые, что с каждой следующей секцией становится все труднее.

Во избежание этих затруднений при обматывании мелких машин с мягкими проволочными секциями иногда применяется укладка первых y секций обеими сторонами на дно пазов; тогда последние y секций окажутся лежащими обеими сторонами в верхнем слое. Это не очень красиво, но может быть допущено, поскольку не оказывает заметного влияния на свойства обмотки.

Однослойная цепная обмотка представляет промежуточную форму между однослойной катушечной и двухслойной обмотками (рис. 31).

Так же как и двухслойная, она выполняется секциями одинаковой величины и формы; но каждая сторона секции полностью занимает тот паз, в который она кладется, поэтому никакие между-

слойные прокладки изоляции в ней не нужны и степень заполнения паза проводниками обмотки у нее выше, а количество секций вдвое меньше, чем у двухслойной обмотки, т. е. равно $^1/_2$ Z, как и у катушечной.

На рис. 32 представлен пример цепной обмотки с нечетным числом пазов на полюс и фазу $q=3$; из этой схемы сразу можно сделать общее заключение, что шаг цепной обмотки должен быть обязательно нечетным. Действительно, если левые стороны всех секций лежат в пазах с нечетными номерами, то для пра-

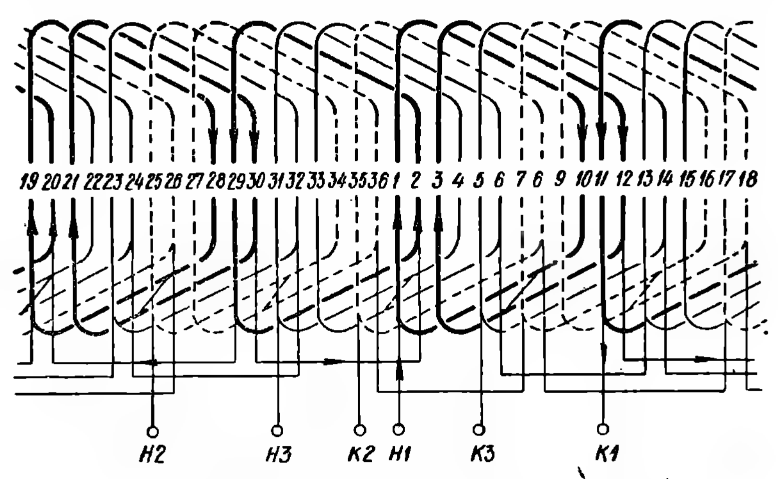


Рис. 32. Схема цепной обмотки для четырехполюсной машины с 3 пазами на полюс и фазу.

вых остаются только пазы с четными номерами, или наоборот. Кроме того, можно сделать и другой вывод: на каждой паре полюсных делений повторяется одно и то же расположение секций всех фаз; следовательно, число параллельных ветвей при нечетном числе пазов на полюс и фазу может быть сделано равным числу пар полюсов.

На рис. 33 показан другой пример цепной обмотки — с четным числом пазов на полюс и фазу $q=2$. И здесь можно сделать некоторые общие выводы; так, при четном числе пазов на полюс и фазу шаг обмотки не может быть диаметральным, так как он не должен быть четным. В данном случае расположение секций всех фаз повторяется на каждом полюсном делении; поэтому число параллельных ветвей при четном числе пазов на полюс и фазу в случае надобности может быть сделано равным числу полюсов.

На рис. 34 дан третий пример цепной обмотки — на этот раз с дробным числом пазов на полюс и фазу $q=1^1/_2$. Сравнивая ее с катушечной обмоткой, имеющей это же число пазов на полюс

и фазу, легко установить, что число возможных параллельных ветвей и здесь равно частному от деления числа пар полюсов на знаменатель дробного числа пазов на полюс и фазу.

Условия выполнимости для цепных обмоток остаются те же, что и для катушечных; они выполнимы только при общем числе

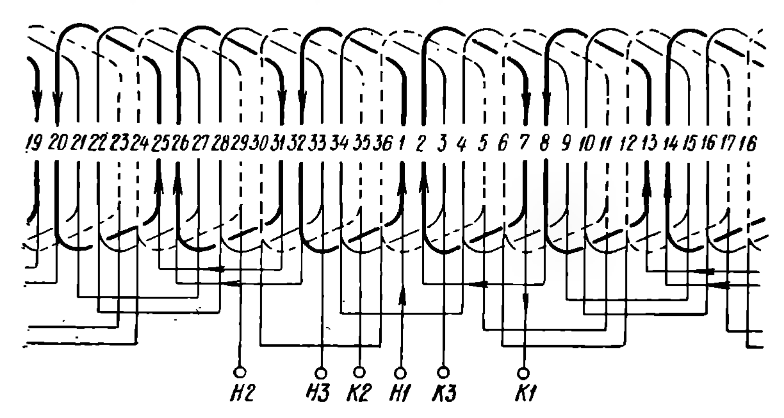


Рис. 33. Схема цепной обмотки для шестиполюсной машины с 2 пазами на полюс и фазу.

пазов, кратном 6, и для них возможны все дробные числа пазов на полюс и фазу, кроме имеющих знаменатели, кратные 3. Но если практическое выполнение катушечных обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу ограничивалось только числами,

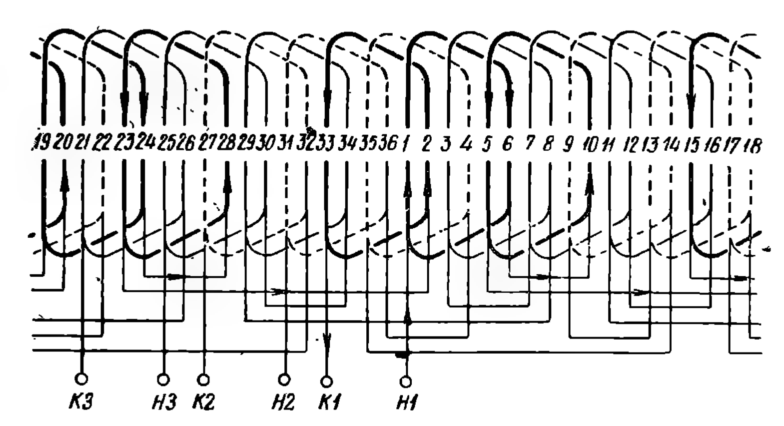


Рис. 34. Схема цепной обмотки для восьмиполюсной машины с $1^1/_2$ пазами на полюс и фазу.

имеющими в знаменателе 2, то для цепных обмоток таких ограничений нет: все возможные дробные числа пазов на полюс и фазу технически осуществимы, поскольку все секции обмотки имеют одинаковые размеры и форму.

Цепные обмотки, как и двухслойные, могут быть выполнены с укороченным (или удлиненным) шагом, но только последний должен всегда иметь лишь нечетные значения. На рис. 35 дан пример обмотки с шагом, укороченным до величины, ближайшей к значению

$$y = 2{,}4q.$$

Цепная обмотка может выполняться как с мягкими, так и с жесткими секциями; но последние встречаются сравнительно редко, потому что форма их лобовых частей получается очень сложной и неудобной для изготовления. По этой причине главной областью применения цепной обмотки являются небольшие двигатели с всыпными мягкими секциями.

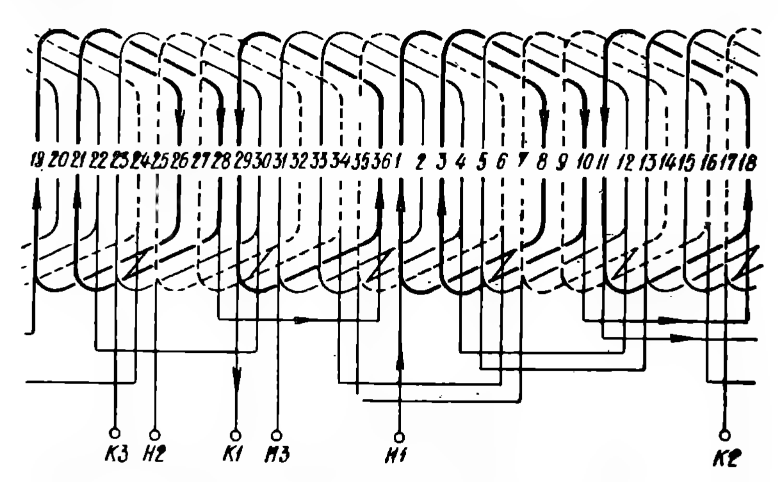


Рис. 35. Схема цепной обмотки с укороченным шагом для четырехполюсной машины.

Подводя итог, можно сказать, что при открытых пазах статора при всех общих числах пазов и для всех чисел полюсов целесообразно применять двухслойную обмотку с жесткими секциями. При полузакрытых пазах, допускающих «всыпание» мягких секций, нужно выбрать либо двухслойную, либо цепную обмотку с мягкими секциями, причем при нечетных общих числах пазов — безусловно первую из них. Наконец, при закрытых пазах или тогда, когда отверстие паза настолько мало, что проводники обмотки не могут ни при каких условиях быть заложены всыпанием, остается принять катушечную обмотку, для двухполюсных машин — с расположением лобовых частей в трех ярусах, а для остальных — с расположением их в двух ярусах и с выполнением либо по способу прошивания, либо посредством разрезных секций.

В заключение необходимо остановиться на одном способе выполнения обмоток, получившем довольно широкое распространение в сравнительно недавнее время, именно на обмотках для машин с так называемыми «полуоткрытыми» пазами. Полуоткрытый

паз имеет несимметричную форму; заплечики, служащие для удерживания клина, на обеих сторонах такого паза неодинаковы, вследствие этого его отверстие смещено на один бок и имеет ширину чуть больше половины ширины паза.

Такое устройство позволяет объединить до некоторой степени преимущества открытых и полузакрытых пазов, так как, с одной

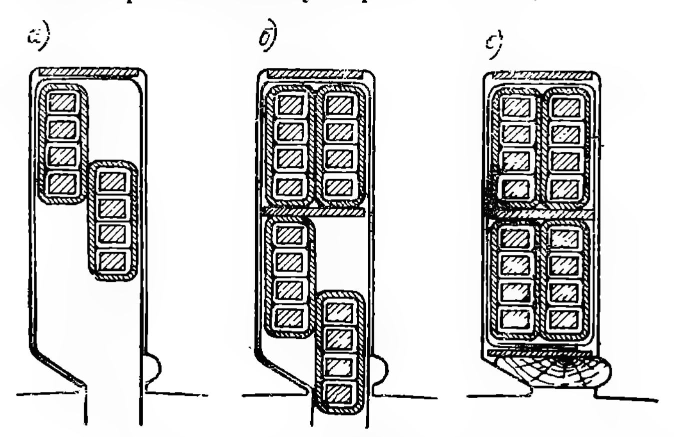


Рис. 36. Порядок вкладывания сторон жёстких секций при полуоткрытых пазах.

стороны, дает возможность иметь относительно неширокое отверстие паза, что благоприятно отражается на электромагнитных свойствах машины, а с другой — допускает укладку жестких секций, хотя и несколько своеобразную.

Именно каждая сторона секции подразделяется при этом по ширине на две самостоятельно изолированные равные части, которые вдвигаются в паз через его отверстие так, как показано на рис. 36, *а*, *б* и *в*.

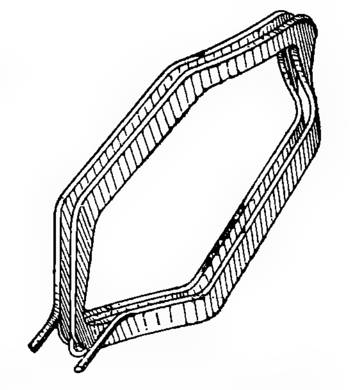


Рис. 37 Секция для статора с полуоткрытыми пазами.

Во избежание повреждения изоляции о края отверстия паза, обязательно следует выстилать его внутренность проходной коробкой из тонкого лощеного электротехнического картона, подобной применяющимся для всыпных обмоток при полузакрытых пазах (см. § 12).

Поскольку при этой системе по ширине паза располагаются не два, а четыре слоя общей изоляции секций, использование паза получается не очень высоким; поэтому она применяется почти исключительно для двигателей низкого напряжения, но довольно больших мощностей — в десятки и даже сотни киловатт, имеющих доста-

точно крупные пазы, в которых изоляция сторон секций отнимает относительно не очень много места. На рис. 37 отдельно представлена двойная секция двухслойной обмотки подобного рода.

7. Типы роторных обмоток

Обмотки фазовых роторов (или роторов с контактными кольцами) принципиально являются такими же трехфазными обмотками, как и статорные; в виде исключения можно упомянуть о применявшихся раньше, но в настоящее время совершенно вышедших из употребления, двухфазных обмотках роторов.

Однако на их выполнение накладывает отпечаток то обстоятельство, что пазы роторов делаются либо закрытыми, либо с настолько незначительным отверстием, что ни о каком закладывании обмотки через него не может быть речи.

Кроме того, величина напряжения роторной обмотки не нормирована, поэтому число ее витков может быть выбрано наиболее благоприятным с точки зрения укладки обмотки в пазах.

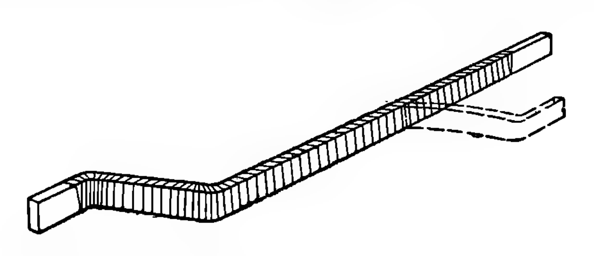


Рис. 38. Полусекция волновой роторной обмотки.

Выполнение катушечной обмотки способом прошивания, рекомендованное для статоров с закрытыми пазами, иногда применяется и для роторных обмоток, главным образом в мелких двигателях. Но ограниченность места, которое могут занимать в роторе лобовые части, и трудность их закрепления против действия центробежных сил заставляют применять этот способ только в крайних случаях и лишь при четных числах пар полюсов; выполнение «кривой» группы катушек при нечетных числах пар полюсов в роторных обмотках чрезвычайно неудобно и к тому же сильно нарушает уравновешенность ротора.

Поэтому в роторах применяется почти исключительно двухслойная стержневая волновая обмотка, очень похожая по внешнему виду на волновую обмотку якоря машины постоянного тока.

Эта обмотка изготовляется из полусекций, имеющих только с одной стороны отформованную лобовую часть (рис. 38); каждая полусекция состоит из одного единственного проводника прямоугольного или специального профильного сечения, изолированного по всей длине, кроме концов, либо, при более крупных сечениях, — из двух проводников, стоящих в пазу рядом. Такие полусекции

вдвигаются в пазы ротора с торца, после чего вторые лобовые части отформовываются уже на месте, как это показано пунктиром. Соединение полусекций друг с другом с обеих сторон производится посредством хомутиков, пропаиваемых припоем.

Как правило, такие обмотки выполняются с целыми числами пазов на полюс и фазу; что касается шага, то он обычно берется диаметральным с тем, чтобы вылеты лобовых частей обмотки по обе стороны ротора были одинаковыми.

Схемы этих обмоток настолько однообразны, что достаточно одного примера для того, чтобы получить необходимое представление об их устройстве.

Такой пример представлен на рис. 39 в виде схемы четырехполюсной обмотки с тремя пазами на полюс и фазу. Для ясности на этой схеме дана только одна фаза обмотки; верхний ее слой изображен сплошной линией, а нижний — пунктирной. Вся фаза состоит из двух частей, одна из которых изображена более жирной линией, а другая — более тонкой. Следуя вдоль обмотки по на-

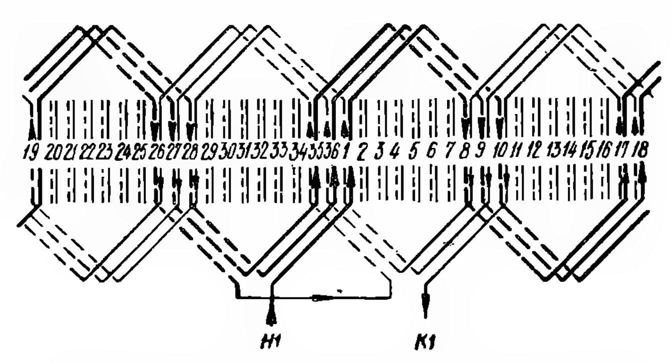


Рис. 39. Схема волновой роторной обмотки для четырехполюсной машины с 3 пазами на полюс и фазу.

правлению стрелок, нетрудно убедиться, что она делает сначала $2p - 1$ диаметральных шагов $y = 3q$, в данном случае три шага, и затем один шаг, укороченный на единицу:

$$y' = 3q - 1.$$

Если бы этот последний шаг тоже был диаметральным, то после первого же обхода обмотка замкнулась бы на себя; но этим укороченным шагом начинается новый обход, который опять делает $2p-1$ диаметральных шагов и один укороченный; после q полных обходов делается переход ко второй части обмотки, устроенной совершенно так же, но направление обходов этой части обратно; если в первой части обходы шли слева направо, то во второй они идут справа налево.

Вместо укорочения последнего шага обхода на единицу можно было бы применить такое же удлинение:

$$y' = 3q + 1,$$

но это менее удобно, потому что лобовые части в местах удлиненного шага получились бы с бóльшим вылетом, чем остальные.

В случае надобности обе части каждой фазы могут быть соединены между собой не только последовательно, но и параллельно, конечно с соблюдением направлений тока; это делается главным образом в очень крупных машинах с целью понизить вдвое напряжение на контактных кольцах; зато вдвое же возрастает ток, снимаемый с колец щеточным аппаратом.

Изредка для фазовых роторов применяются обмотки также и с дробными числами пазов на полюс и фазу, преимущественно вида

$$q = A + \frac{1}{2},$$

где A есть некоторое целое число. На рис. 40 представлена четырехполюсная обмотка с числом пазов на полюс и фазу $q = 2^1/_2$, т. е. с $A = 2$.

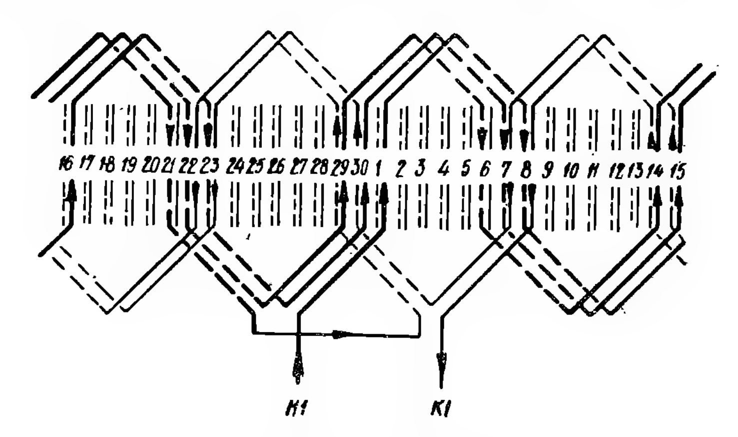


Рис. 40. Схема обмотки четырехполюсного ротора с $2^1/_2$ пазами на полюс и фазу.

Так как число пазов, приходящихся на долю одного полюса, т е.

$$3q = 3A + \frac{3}{2},$$

также является дробным, то шаг таких обмоток не может быть диаметральным.

Поэтому приходится придавать шагам с задней и с передней сторон ротора попеременно те целые значения, между которыми заключено дробное число пазов на один полюс:

$$3A + 1 < 3A + \frac{3}{2} < 3A + 2.$$

Практически удобно принимать для первого шага (с задней стороны ротора) меньшее из этих чисел, т. е. $y_1 = 3A + 1$, а для второго (с передней стороны) большее, т. е. $y_2 = 3A + 2$, затем

снова $y_1 = 3A + 1$ (с задней стороны), опять $y_2 = 3A + 2$ (с передней) и т. д., пока не будет закончен первый обход окружности ротора. Если при этом сделать последний шаг (с передней стороны) равным $3A + 2$, обмотка замкнется; чтобы начать новый обход, необходимо этот шаг сделать на единицу меньшим, т. е. поступить так, как и при целом числе пазов на полюс и фазу.

Таким образом, последний шаг, осуществляющий переход к новому обходу окружности, должен быть взят равным

$$y' = 3A + 1 = y_1.$$

В последнее время для фазовых роторов двигателей средней мощности стали применяться обмотки, подобные статорным и состоящие из жестких секций, содержащих более или менее значительное количество витков из проводника прямоугольного сечения, уложенных плашмя друг над другом в узких и глубоких открытых пазах прямоугольной формы. Такая конструкция обмотки преследует две основные цели: изготовление вполне отформованных и изолированных роторных секций отдельно от машины и повышение напряжения, а значит соответствующее понижение тока обмотки ротора, позволяющее облегчить контактные кольца, щеточный аппарат и пусковой реостат.

Эти обмотки, как правило, имеют целые числа пазов на полюс и фазу, но в случае надобности могут быть применены и при всех дробных числах, пригодных для двухслойных статорных обмоток. Вследствие трудности изготовления секций по причине сложности формы лобовых частей ремонт таких обмоток очень затруднителен.

Что касается обмоток короткозамкнутых роторов (обмоток в виде «беличьего колеса»), то среди всего разнообразия применяющихся типов можно выделить следующие:

1. Простые короткозамкнутые обмотки; составляющие их стержни имеют большей частью круглое сечение, реже овальное или прямоугольное, с соотношением сторон, не очень сильно отличающимся от единицы (рис. 41, *a*). Это — наиболее старый тип обмоток, в настоящее время почти совершенно не применяемый. Двигатели, имеющие такие обмотки, отличаются меньшим номинальным скольжением и несколько более высоким коэффициентом полезного действия, чем прочие, но зато обладают низким пусковым моментом и большим пусковым током, что и является их крупным недостатком.

2. Двойные короткозамкнутые обмотки состоят из двух рядов стержней; верхний ряд имеет обычно круглое сечение и выполняется из бронзы или какого-нибудь другого металла с высоким удельным сопротивлением; нижний же ряд — преимущественно прямоугольного, реже круглого сечения, как правило большего, чем сечение верхнего ряда, состоит из медных стержней. Короткозамыкающие кольца большей частью делаются у каждого ряда свои, но иногда попадаются обмотки и с общими кольцами

для обоих рядов. Верхняя обмотка предназначается только для пускового периода и участие ее в работе при нормальной нагрузке очень невелико. Нижняя же обмотка является рабочей, а в процессе пуска почти не принимает участия. На рис. 41, *б* дано несколько форм пазов этих роторов. Двигатели с двойной короткозамкнутой обмоткой ротора отличаются большим пусковым моментом и относительно небольшим пусковым током, но имеют более низкие значения коэффициента мощности (cos φ), и наибольшего («опрокидывающего») вращающего момента.

3. Обмотки с глубокими пазами состоят из стержней очень узкого и высокого прямоугольного сечения, заложенных в щелевидные пазы, нередко совершенно открытые (рис. 41, *в*). Двигатели с такими обмотками по своим свойствам приближаются к двигателям с двойной обмоткой.

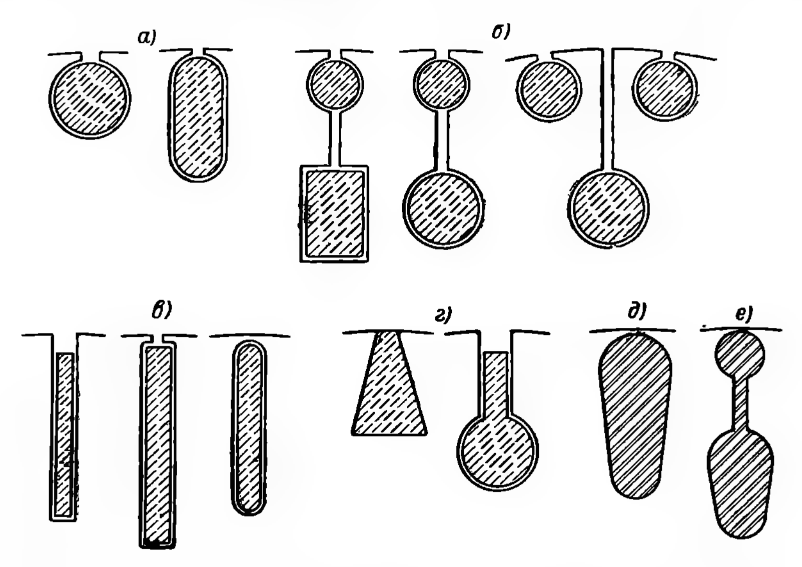


Рис. 41. Употребительные формы пазов короткозамкнутых роторов.

4. В самое последнее время в роторах более крупных двигателей стали находить применение обмотки со стержнями специальных профилей — трапециевидного и бутылочного (рис. 41, *г*). Обмотки этого типа весьма близки по своим свойствам к двойным обмоткам.

Соединение стержней и колец обмоток всех этих типов, производившееся раньше разными способами: пайкой, расклепыванием, винтовыми соединениями и т. д., в настоящее время производится почти исключительно автогенной пайкой твердым припоем.

5. Получившие широкое распространение для мелких, а в последнее время для средних и даже довольно крупных машин литые алюминиевые обмотки отливаются прямо на сердеч-

нике ротора вместе с короткозамыкающими кольцами и даже вентиляционными крыльями. По форме пазов они занимают среднее положение между простыми обмотками и обмотками с глубокими пазами (рис. 41, *д*); соответственно этому и свойства их являются промежуточными между этими двумя типами.

Иногда встречаются литые алюминиевые обмотки, подобные двойным (рис. 41, *е*); обычно стержни верхней и нижней клеток соединяются в них тонкой перемычкой.

В отдельных случаях для литых обмоток применяются алюминиевые сплавы с повышенным удельным сопротивлением, назначением которых является повышение начального пускового вращающего момента.

8. Составление схем обмоток

В задачу расчета обмотки входит не только выбор ее типа и определение числа витков и сечения проводника, но и составление технического документа, на основании которого обмотчик может произвести соединение отдельных секций обмотки в одно целое.

Таким документом служит схема обмотки, дающая ясное и наглядное представление о необходимых соединениях. Построение схемы начинается с изображения пазов тем или иным условным способом и их нумерации. Если на схеме нумерация идет слева направо, то в натуре на статоре нумерация окажется идущей по поверхности против часовой стрелки, а на роторе — по часовой стрелке; однако может быть принята и обратная нумерация.

После этого следует наметить распределение пазов между фазами. При черчении схем рекомендуется применять для каждой фазы свое условное обозначение; так, на всех схемах этой книги одна фаза нанесена сплошной жирной линией, другая — тонким пунктиром и третья — сплошной тонкой. Еще удобнее применять для черчения схем цветные карандаши, например для первой фазы — красный, для второй — синий, для третьей — черный или зеленый и т. п.

Рассмотрим, как производить это распределение при целых числах пазов на полюс и фазу. Наиболее просто оно делается для однослойных катушечных обмоток: достаточно лишь откладывать для каждой фазы по q пазов, начиная от паза *1*.

При двухслойной обмотке то же самое следует произвести сначала с одним только верхним слоем, после чего повторить заполнение для нижнего слоя таким же порядком, но начиная с паза, имеющего номер $y + 1$.

При цепной обмотке следует занять для первой фазы все нечетные пазы, номера которых меньше или равны q; это же повторяется на каждой следующей паре полюсных делений прибавлением каждый раз по $6q$ к номерам уже занятых пазов. Так, например, если $q = 3$, то сначала занимаются пазы 1 и 3, а затем к их номерам добавляется $6 \cdot 3 = 18$, что дает пазы 19 и 21, потом $2 \cdot 6 \cdot 3 =$

$=36$, что дает пазы 37 и 39 и т. д., пока не будет обойдена вся окружность. После этого при четных значениях q занимаются все пазы, номера которых больше уже занятых на $3q$, а при нечетных q — те, номера которых равны всем четным числам, меньшим q, сложенным последовательно с $3q$, $9q$, $15q$ и т. д.; в нашем примере это будут пазы $3 \cdot 3 + 2 = 11$; $9 \cdot 3 + 2 = 29$; $15 \cdot 3 + 2 = 47$ и т. д. В результате этой операции на окружности будет занята $^1/_6$ всех пазов для левых сторон секций первой фазы. Чтобы покончить с этой фазой, достаточно к каждому уже занятому пазу подобрать другой, отстоящий от него на расстоянии выбранного шага, в который должна лечь правая сторона соответствующей секции. Так, если в нашем примере взят шаг $y = 7$, это будут пазы $1 + 7 = 8$; $3 + 7 = 10$; $11 + 7 = 18$; $19 + 7 = 26$; $21 + 7 = 28$; $29 + 7 = 36$; $37 + 7 = 44$; $39 + 7 = 46$; $47 + 7 = 54$ и т. д. Нетрудно убедиться, что схема рис. 35 вполне соответствует изложенному.

При всех системах обмоток номера пазов второй фазы получаются из номеров пазов первой фазы добавлением $2q$, а номера пазов третьей фазы — добавлением $4q$. Так, если в нашем примере укладка первой фазы начата от паза *1*, то второй — от паза с номером $2 \cdot 3 + 1 = 7$, и третьей — от паза с номером $4 \cdot 3 + 1 = 13$.

Когда все пазы распределены между фазами, следует нанести лобовые части в соответствии с принятым типом обмотки, соблюдая всегда соединение сторон секций сообразно шагу.

Наконец, нужно нанести соединения секций друг с другом, придерживаясь избранного способа соединения — последовательного или с параллельными ветвями. Во всех случаях без исключения соединения секций одной и той же фазы друг с другом должны производиться таким образом, чтобы стороны секций, принадлежащие к одному и тому же полюсному делению (т. е. расположенные в непосредственной близости друг от друга для совместного действия), обходились от начала фазы к ее концу в одном и том же направлении, как обозначено стрелками на всех схемах, приведенных в этой книге.

Одновременно с этим следует выбрать расположение начал и концов всех фаз.

Если все секции каждой фазы соединены последовательно, то разрыв любой перемычки между группами секций может дать начало и конец фазы. Для того чтобы соединения обмотки с доской зажимов были наиболее короткими и занимали как можно меньше места, следует производить такой разрыв в каждой фазе поблизости от того места, где располагается эта доска.

Но для того чтобы избежать ошибок, при которых в одной из фаз начало будет принято за конец и конец за начало, что поведет к выворачиванию этой фазы, следует принять за правило: начала (а соответственно и концы) всех трех фаз должны быть расположены друг от друга на расстоянии $2q$ пазов. Именно так расположены начала и концы фаз на всех схемах статорных обмоток, приведенных в этой книге.

Если все секции соединены в две и более параллельных ветвей, изложенное правило должно прилагаться к одной из них в каждой фазе.

При дробных числах пазов на полюс и фазу распределение пазов между фазами сложнее, чем при целых. Для катушечных обмоток количества секций каждой фазы, входящих в одну группу, поочередно равны тем двум целым числам, между которыми заключено данное дробное число пазов на полюс и фазу. Поэтому распределение пазов между фазами должно быть сделано так: начиная от паза *1*, под первую фазу отводится число пазов, равное большему из этих двух чисел; затем для третьей и для второй фазы — по меньшему из этих чисел, далее для первой и третьей фаз по большему, для второй и первой по меньшему и т. д. Так, например, при числе пазов на полюс и фазу $q = 1^1/_2$ распределение выглядит следующим образом:

Первая фаза	2	—	—	2	—	—	1	—	—	1	—	—	2	и т. д.
Вторая фаза	—	—	1	—	—	1	—	—	2	—	—	2	—	
Третья фаза	—	1	—	—	2	—	—	2	—	—	1	—	—	

Нетрудно убедиться, что эта таблица вполне соответствует схеме рис. 21.

После этого построение лобовых частей и выполнение соединений между секциями уже не представляет затруднений.

Для составления схемы д в у х с л о й н о й обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу, имеющим вид:

$$q = A + \frac{B}{C},$$

где A, B и C — некоторые целые числа, а $\frac{B}{C}$ — несократимая дробь, можно применить такой прием: предварительно составляется схема обмотки с ц е л ы м числом пазов на полюс и фазу $q' = A$ и с тем шагом y, который выбран для данной обмотки. После этого на каждых C рядом лежащих полюсных делениях к данной фазе добавляется B секций, которые должны быть по возможности более равномерно распределены по этому участку. Каждые следующие C полюсных делений должны повторять то же самое.

Места, в которых добавляются эти B секций к секциям первой фазы, могут быть выбраны произвольно, причем не одним, а несколькими различными способами.

Но после того как это так или иначе сделано, места добавления секций в остальные фазы становятся уже вполне определенными: для третьей фазы они отстоят от соответствующих мест пер-

вой фазы на расстояниях, равных одной трети длины C полюсных делений, а для второй фазы — на расстояниях, равных двум третям этой длины.

Пусть, например, требуется составить схему двухслойной обмотки для машины с числом полюсов $2p = 8$ при общем числе пазов статора $Z = 54$.

Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{Z}{3 \cdot 2p} = \frac{54}{3 \cdot 8} = 2^1/_4,$$

т. е. $A = 2$, $B = 1$ и $C = 4$.

Наиболее подходящим шагом будет

$$y = 2{,}4 \cdot 2{,}25 = 5{,}4 \approx 5,$$

или из паза 1 в 6-й.

На рис. 42, *а* дана вспомогательная схема обмотки, имеющей $q' = 2$ и шаг $y = 5$; эта схема построена не для восьми, а только для $C = 4$ полюсных делений, так как следующие четыре полюсных деления будут представлять их полное повторение. В каждую фазу на этом промежутке должно быть добавлено по $B = 1$ секции. Разрезаем слой пазов на схеме по пунктирным линиям *I—I*, *II—II* и *III—III* и раздвигаем его в каждом разрезе на одно пазное деление, не нарушая целости лобовых частей; расстояния между разрезами как раз равны $^1/_3$ рассматриваемого участка обмотки. В образовавшиеся промежутки могут быть вставлены недостающие секции, по одной в каждую фазу; рис. 42, *б* дает результат этой операции, являющийся ответом на поставленную задачу; остается лишь дополнить схему до восьми полюсных делений и снабдить ее соединениями между секциями.

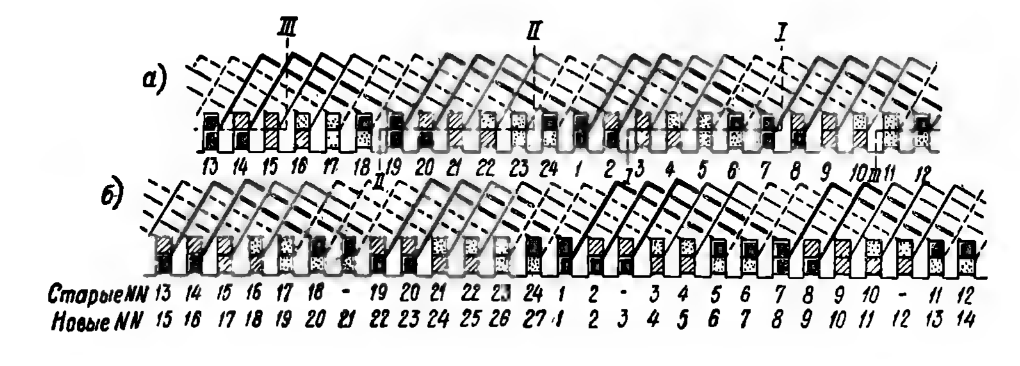
Построение схем обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу можно вести и обратным путем — посредством у д а л е н и я лишних секций из вспомогательной обмотки, имеющей целое число пазов на полюс и фазу $q' = A + 1$; пример такого построения показан на рис. 43, *а* и *б*; номера секций, предназначенных для удаления, отмечены на нем кружками.

9. Таблицы обмоток

При всей наглядности схем обмоток большим их недостатком является трудоемкость вычерчивания; но для обмотчика вовсе не нужна вся схема обмотки — ему требуется только знать, в каком порядке следует соединить секции друг с другом.

Этому назначению вполне отвечают таблицы обмоток, в которые вносятся номера тех пазов, проводники которых подлежат соединению друг с другом; достоинством таблиц является то, что их составление производится совершенно механически, по определенному шаблону.

Проще всего рассмотреть составление таблиц на примере. Пусть требуется составить таблицу для четырехполюсной двух-



Рис, 42. Получение двухслойиой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу из обмотки с целым числом по способу добавлеиия секций.

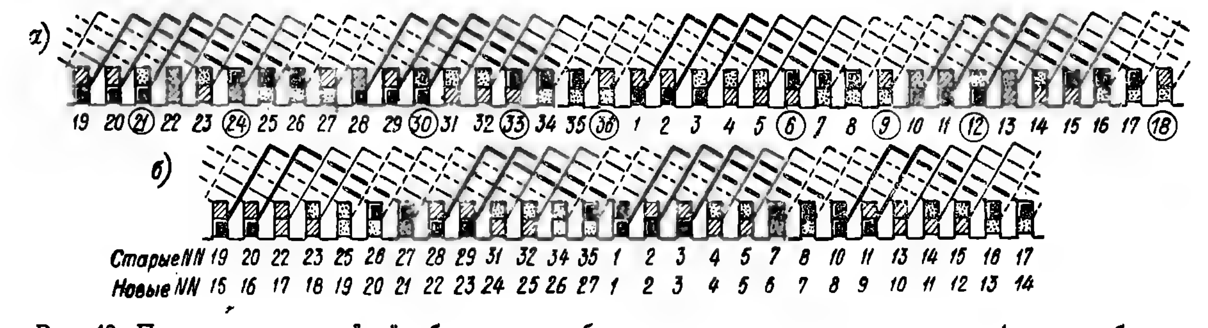


Рис. 43. Получение двухслойной обмотки с дробиым числом пазов на полюс и фазу из обмотки с целым числом по способу удаления секций.

слойной обмотки, имеющей общее число пазов $Z=36$, т. е. с числом пазов на полюс и фазу

$$q=\frac{36}{3\cdot 4}=3,$$

при шаге $y=7$, притом так, чтобы число параллельных ветвей было $a=2$ (рис. 44).

Каждая секция в таблице изображается номерами тех пазов, в которых лежат ее стороны, причем номера пазов сторон, находящихся в верхнем слое, ставятся, например, слева, а находящихся в нижнем слое — справа, или наоборот. Соединения секций друг с другом изображаются стрелками, направленными от начала данной фазы к ее концу.

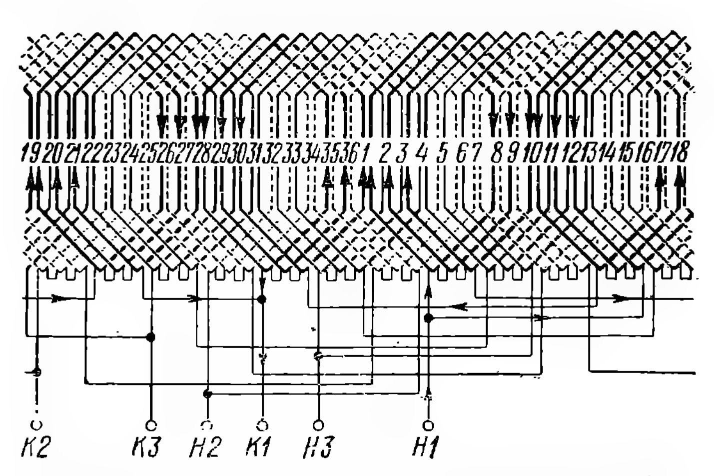


Рис. 44. Схема двухслойной обмотки для четырехполюсной машины с 3 пазами на полюс и фазу и с двумя параллельными ветвями.

В статорных обмотках следует располагать начала всех фаз по возможности ближе друг к другу: если начало первой фазы лежит в пазу *1*, то при целом числе пазов на полюс и фазу начало второй фазы может лежать в пазу, отстоящем от первого на $2q$ в сторону возрастания номеров, или на $4q$ в сторону убывания, а начало третьей — на $4q$ в сторону возрастания или на $2q$ в сторону убывания. Исходя из этого, можно написать для каждой фазы таблицу для групп ближайших к началу q секций, т. е. в данном случае трех:

Фаза I		Фаза II		Фаза III	
Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ
Н1 → 1	8	Н2 → 25	32	Н3 → 31	2
↙ 2	9	↙ 26	33	↙ 32	3
↙ 3	10 →	↙ 27	34 →	↙ 33	4 →

Продолжение таблицы для следующих групп из трех секций каждой фазы может быть получено путем прибавления ко всем номерам этой первой части таблицы одного и того же слагаемого, равного $3q$, т. е. в данном случае 9; но направления стрелок должны быть взяты противоположными, так как направления токов в этих группах обратны предыдущим:

← *10* — *17*	← *34* — *5*	← *4* — *11*
11 — *18*	*35* — *6*	*5* — *12*
12 — *19* ←	*36* — *7* ←	*6* — *13* ←

Совершенно так же можно продолжить таблицу еще для следующих групп из трех секций в каждой фазе, опять увеличивая все номера на 9; направление стрелок здесь должно быть тем же, что и в первой части таблицы:

→ *19* — *26*	→ *7* — *14*	→ *13* — *20*
20 — *27*	*8* — *15*	*14* — *21*
21 — *28* →	*9* — *16* →	*15* — *22* →

Наконец, последняя часть таблицы получается, как и вторая:

К1 ← *28* — *35*	*К2* ← *16* — *23*	*К3* ← *22* — *29*
29 — *36*	*17* — *24*	*23* — *30*
30 — *1* ←	*18* — *25* ←	*24* — *31* ←

Теперь остается сделать соединения групп между собой для получения заданных двух параллельных ветвей в каждой фазе. На первый взгляд проще всего принять за одну параллельную ветвь две ближайшие друг к другу группы, соединив их между собой последовательно, и затем соединить начала и концы получившихся ветвей друг с другом; так, например, в первой фазе для этого нужно было бы соединить между собой низ паза *10* с низом *19*, низ паза *28* с низом *1*, а затем верх *1* с верхом *19*, что представляло бы общее начало параллельных ветвей, и верх *10* с верхом *28*, что дало бы их общий конец.

Но в асинхронных двигателях не рекомендуется включать в состав одной параллельной ветви группы секций, расположенные рядом; наоборот, следует стремиться производить соединение так, чтобы группы, входящие в состав каждой параллельной ветви, были равномерно расположены по окружности машины. Этим предотвращается неравномерность распределения тока между ветвями в том случае, когда ротор расположен эксцентрично по отношению к статору, например при сильно сработавшихся подшипниках или вследствие неточности сборки. В данном примере нужно составить

одну ветвь из первой и третьей групп, а другую ветвь — из второй и четвертой групп.

Для этого следует соединить низ паза *10* с верхом *19* и верх *10* с низом *1*; общим началом будет служить соединение верха *1* с низом *19*, а общим концом — соединение низа *28* с верхом *28* (рис. 44).

Для удобства таблица может быть переписана так, что номера пазов каждой параллельной ветви идут в ней подряд; она принимает после этого следующий вид:

Н1		Н2		Н3	
12 — 19	1 — 8	36 — 7	25 — 32	6 — 13	31 — 2
11 — 18	2 — 9	35 — 6	26 — 33	5 — 12	32 — 3
10 — 17	3 — 10	34 — 5	27 — 34	4 — 11	33 — 4
30 — 1	19 — 26	18 — 25	7 — 14	24 — 31	13 — 20
29 — 36	20 — 27	17 — 24	8 — 15	23 — 30	14 — 21
28 — 35	21 — 28	16 — 23	9 — 16	22 — 29	15 — 22
К1		К2		К3	

В некоторых случаях приходится идти на применение наибольшего возможного числа параллельных ветвей; при этом в состав каждой параллельной ветви входит только одна группа секций, как, например, представлено на рис. 45 для обмотки с теми же самыми данными, что и предыдущая, но с $a = 4$.

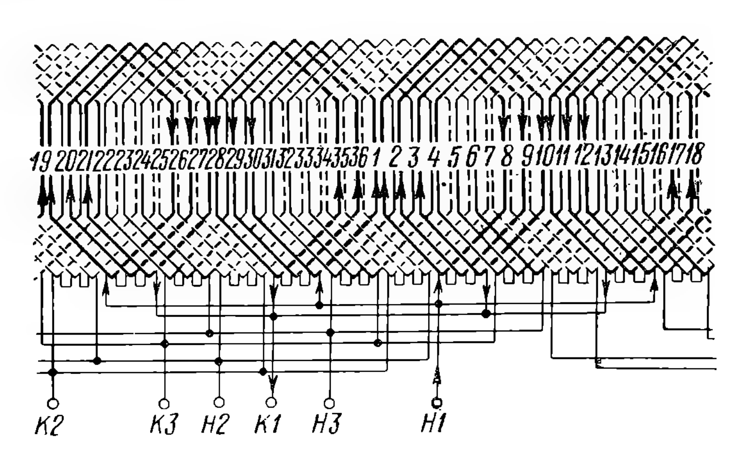


Рис. 45. Та же обмотка, что и на схеме рис. 44, но с 4 параллельными ветвями.

Такое устройство обмотки нельзя считать удачным, потому что в случае возможной неравномерности зазора целые параллельные

ветви будут попадать при нем в места с зазором, пониженным или повышенным против среднего значения; поэтому к нему можно прибегать только в крайних случаях.

Применение таблиц с успехом может быть распространено и на обмотки с дробными числами пазов на полюс и фазу. Рекомендуемый для этого метод аналогичен описанному выше методу построения схем таких обмоток. Прежде всего составляется вспомогательная таблица для обмотки с одним из тех целых чисел пазов на полюс и фазу, между которыми заключено данное дробное; здесь более удобным является исключение лишних секций, для чего следует отдать предпочтение большему из этих двух чисел.

Пусть, например, требуется составить таблицу для четырехполюсной двухслойной статорной обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q = 2^1/_4$ и шагом $y = 5$.

Тогда прежде всего следует составить таблицу для вспомогательной обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q' = 3$ и тем же шагом $y = 5$.

Такая таблица может быть очень легко получена из приведенной выше таблицы для двухслойной обмотки с этим же числом пазов на полюс и фазу $q = 3$, но с шагом $y = 7$, путем понижения всех номеров пазов нижних сторон секций на разность этих шагов, т. е. на 7—5 = 2. Кроме того, исходя из условий выполнимости такой обмотки, в ней нужно переделать параллельное соединение ветвей на последовательное.

После выполнения этих операций таблица примет вид:

	Верх	Низ		Верх	Низ		Верх	Низ
Н1 →	1	6	Н2 →	25	30	Н3 →	31	36
	2	7		26	31		32	1
	3	8		27	32		33	2
	12	17		36	5		6	11
	11	16		35	4		5	10
	10	15		34	3		4	9
	19	24		7	12		13	18
	20	25		8	13		14	19
	21	26		9	14		15	20
	30	35		18	23		24	29
	29	34		17	22		23	28
К1 ←	28	33	К2 ←	16	21	К3 ←	22	27

Здесь нужно удалить из каждой фазы по три секции; удобно принять за правило удалять всегда последнюю секцию из группы (т. е. имеющую наибольшие номера сторон). Так, из первой фазы будут удалены секции *12—17, 21—26* и *30—35*. Для того чтобы

обмотка получилась вполне симметричной, нужно удалить из остальных фаз секции, расположенные под углами в 120° к секциям, удаленным из первой фазы; поэтому их номера пазов должны отличаться на $\frac{Z}{3}=\frac{36}{3}=12$ и $\frac{2Z}{3}=\frac{2\cdot 36}{3}=24$ от номеров уже удаленных секций. Следовательно, из второй фазы удаляются секции *36—5*, *9—14* и *18—23*, а из третьей — секции *24—29*, *33—2* и 6—11.

Таким образом, таблица приобретает вид:

H1 → *1 — 6*	*H2* → *25 — 30*	*H3* → *31 — 36*
2 — 7	*26 — 31*	*32 — 1*
3 — 8	*27 — 32*	*5 — 10*
11 — 16	*35 — 4*	*4 — 9*
10 — 15	*34 — 3*	*13 — 18*
19 — 24	*7 — 12*	*14 — 19*
20 — 25	*8 — 13*	*15 — 20*
29 — 34	*17 — 22*	*23 — 28*
K1 ← *28 — 33*	*K2* ← *16 — 21*	*K3* ← *22 — 27*

Теперь нужно составить вспомогательную табличку для перевода номеров пазов на новую нумерацию. Это достаточно сделать для одного какого-нибудь слоя, например верхнего.

Из этого слоя выпали следующие номера: *6, 9, 12, 18, 21, 24, 30, 33, 36*. Эти номера должны отсутствовать в ряде, служащем для перевода номеров:

Старые:	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*7*	*8*	*10*	*11*	*13*	*14*	*15*	*16*	*17*
Новые:	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*
Старые:	*19*	*20*	*22*	*23*	*25*	*26*	*27*	*28*	*29*	*31*	*32*	*34*	*35*	
Новые:	*15*	*16*	*17*	*18*	*19*	*20*	*21*	*22*	*23*	*24*	*25*	*26*	*27*	

После этого не представляет затруднений переписать таблицу в окончательном виде, помня, что номера пазов нижнего слоя должны быть больше номеров пазов верхнего слоя на величину шага, в данном случае $y=5$ (стр. 57).

Особенно просто составляются таблицы роторных обмоток. Пусть, например, требуется составить таблицу для четырехполюсной волновой обмотки с тремя пазами на полюс и фазу, представленной на рис. 39.

Если начало первой фазы лежит в верхнем слое паза *1*, то номер того паза, с низом которого соединяется верх паза *1*, будет получен прибавлением к его номеру величины шага, который здесь равен 9; это дает паз *10*. Дальше обмотка делает опять такой же шаг и попадает в верх паза *19*, а оттуда в низ паза *28*. Последний шаг обхода должен быть на единицу меньше, т. е. равен 8, следо-

вательно, обмотка приходит в верх паза *36*. Отсюда начинается второй обход, и т. д., пока не будет сделано q обходов, в данном случае три, чем и закончится первая половина фазы.

Н1 → 1 — 6	Н2 → 19 — 24	Н3 → 24 — 2
2 — 7	20 — 25	25 — 3
3 — 8	21 — 26	5 — 10
9 — 14	27 — 5	4 — 9
8 — 13	26 — 4	10 — 15
15 — 20	6 — 11	11 — 16
16 — 21	7 — 12	12 — 17
23 — 1	14 — 19	18 — 23
К1 ← 22 — 27	К2 ← 13 — 18	К3 ← 17 — 22

Точно так же можно поступать и с прочими фазами; стоит лишь определить, где будут расположены их начала. Если в статорных обмотках следует стремиться к тому, чтобы начала всех фаз были расположены по возможности ближе друг к другу, так как это позволяет иметь наиболее короткие выводные концы для присоединения обмотки к доске зажимов, то в роторных обмотках дело обстоит совершенно иначе.

Пространство, в котором могут быть расположены соединения и выводы, очень ограниченно, и скучивать их в одном месте неудобно. Кроме того, скопление выводов и перемычек создает значительную неуравновешенность ротора, что также нежелательно. Поэтому начала фаз нужно разместить по возможности дальше друг от друга, в особенности в роторах небольших и быстроходных двигателей.

Для всех чисел пар полюсов, не кратных трем, можно разместить начала фаз вполне равномерно по окружности, т. е. под углами в 120° друг к другу.

Следовательно, в даном случае начало второй фазы можно расположить в пазу с номером

$$\frac{Z}{3}+1=\frac{36}{3}+1=13,$$

а начало третьей фазы — в пазу с номером

$$\frac{2Z}{3}+1-\frac{2\cdot 36}{3}+1=25.$$

Тогда таблицы для первых половин второй и третьей фаз будут получены прибавлением соответственно 12 и 24 к номерам пазов таблицы первой фазы:

Фаза I		Фаза II		Фаза III	
	Верх – Низ		Верх – Низ		Верх – Низ
Н1 →	1 – 10	Н2 →	13 – 22	Н3 →	25 – 34
	19 – 28		31 – 4		7 – 16
	36 – 9		12 – 21		24 – 33
	18 – 27		30 – 3		6 – 15
	35 – 8		11 – 20		23 – 32
	17 – 26 →		29 – 2 →		5 – 14 →

Теперь следует выбрать место для конца второй половины первой фазы; так как обходы ее производятся в противоположном направлении, то ее конец должен быть расположен аналогично началу первой половины, т. е. выходить из верха какого-либо паза; а для того чтобы перемычка между половинами фазы была как можно короче, нужно расположить этот конец по возможности ближе к пазу, в котором лежит начало первой половины. Таким местом расположения конца второй половины будет верх паза, номер которого отличается от номера паза начала первой половины на $3q$, т. е. в нашем примере на 9, в сторону возрастания или убывания номеров; это дает на выбор пазы *10* и *28*. Так как сложение удобнее вычитания, то выберем первый из них. Тогда таблица для второй половины первой фазы будет получена из предыдущей увеличением всех номеров на 9; но это же будет относиться и к остальным фазам:

Фаза I		Фаза II		Фаза III	
К1 ←	10 – 19	К2 ←	22 – 31	К3 ←	34 – 7
	28 – 1		4 – 13		16 – 25
	9 – 18		21 – 30		33 – 6
	27 – 36		3 – 12		15 – 24
	8 – 17		20 – 29		32 – 5
	26 – 35 ←		2 – 11 ←		14 – 23 ←

Остается только соединить обе таблицы в одну и установить перемычки для последовательного соединения половин фаз: в первой фазе низ *26* с низом *35*, во второй — низ *2* с низом *11* и в третьей — низ *14* с низом *23*.

Если число полюсов кратно трем, то распределить начала, а следовательно, и концы трех фаз равномерно по окружности ротора нельзя, так как под углами в 120° друг к другу всегда будут находиться пазы, принадлежащие к одной и той же фазе; в этом случае остается только разбросать начала фаз по возможности дальше друг от друга и учесть, что неполная равномерность их распределения может служить источником неуравновешенности ротора. Пусть, например, требуется составить таблицу обмотки для

шестиполюсного ротора с общим числом пазов $Z = 54$. Число пазов на полюс и фазу здесь

$$q = \frac{Z}{3 \cdot 2p} = \frac{54}{3 \cdot 6} = 3.$$

Так как число полюсов кратно трем, то в пазах с номерами

$$\frac{Z}{3} + 1 = \frac{54}{3} + 1 = 19 \text{ и } \frac{2Z}{3} + 1 = \frac{2 \cdot 54}{3} + 1 = 37$$

лежат стороны секций той же фазы, что и в пазу *1*.

Поэтому, если начало первой фазы лежит в пазу *1*, то начала второй и третьей фаз надо поместить в пазах, по возможности близких к пазам *19* и *37*.

С другой стороны, известно, что начала второй и третьей фаз могли бы лежать в пазах с номерами

$$2q + 1 = 2 \cdot 3 + 1 = 7 \text{ и } 4q + 1 = 4 \cdot 3 + 1 = 13;$$

но с одинаковым успехом можно их поместить и в пазы, отстоящие от них на $6q = 18$, $2 \cdot 6q = 36$ и т. д., т. е. в пазы

$$7 + 18 = 25 \qquad 13 + 18 = 31$$

или

$$7 + 36 = 43 \qquad 13 + 36 = 49.$$

Первые два из этих номеров достаточно близки к номерам 19 и 37, и их можно принять для начал второй и третьей фаз. Однако вместе с тем они неравномерно расположены по окружности ротора, вследствие чего нужно ожидать некоторой его неуравновешенности и принять меры к ее устранению.

В роторных обмотках при дробных числах пазов на полюс и фазу вида

$$q = A + \frac{1}{2}$$

обмотка каждой фазы не может состоять из двух одинаковых частей, содержащих по q обходов; числа обходов в каждой из частей будут равны тем целым числам, между которыми заключено дробное число пазов на полюс и фазу: $A < q < A + 1$.

Следует всегда начинать построение схемы или таблицы такой обмотки с части, содержащей большее из этих чисел обходов, т. е. $A + 1$ обходов. Если ее начало, являющееся одновременно и началом фазы, расположено в верхнем слое паза *1*, то ее конец, служащий началом перемычки между частями обмотки, придется в нижнем слое паза с номером, равным $Z—4A—1$.

Для того чтобы перемычка получилась наиболее короткой, нужно поместить начало второй части обмотки, одновременно являющееся концом фазы, в верхний слой паза с номером, равным $3A + 2$.

Тогда конец этой части, служащий окончанием перемычки, окажется в нижнем слое паза с номером

$$Z - A + 1.$$

Поступая совершенно так же, как и при составлении таблицы обмотки ротора с целым числом пазов на полюс и фазу, нетрудно составить таблицу для обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу. В качестве упражнения можно рекомендовать произвести составление таблицы для обмотки, представленной на схеме рис. 40.

Подобным же способом могут быть составлены таблицы и для цепных обмоток как с целыми, так и с дробными числами пазов на полюс и фазу, с той лишь разницей, что роли верхнего и нижнего слоев здесь играют пазы с нечетными и четными номерами; первые из них содержат только левые стороны секций, а вторые — только правые. При составлении этих таблиц могут быть применены правила, изложенные при описании составления схем этих обмоток.

На первых шагах практики составления таблиц можно рекомендовать производить параллельно с ним построение схем, что очень помогает освоению законов проектирования обмоток; но когда навык в том и другом будет приобретен, преимущества таблиц станут очевидными.

10. Электродвижущая сила в обмотке статора

Вращающееся магнитное поле, создаваемое обмоткой статора и движущееся по его внутренней поверхности, не распределено равномерно в пределах каждого полюсного деления; начиная от края последнего, плотность его распределения, или, как ее называют, «магнитная индукция», постепенно возрастает, достигает наибольшей величины $B_в$ в середине полюсного деления и затем убывает до противоположного края полюсного деления, где меняет свое направление или «полярность». Единица для измерения индукции носит название г а у с с [*гс*].

Таким образом, закон распределения индукции по окружности статора может быть изображен волнообразной периодической кривой с длиной каждой полуволны, равной полюсному делению. С достаточной точностью для большинства практических целей можно считать, что эта кривая является так называемой с и н у с о и д о й, или линией, изображающей изменение тригонометрической функции с и н у с а в зависимости от изменения угла, к которому он относится.

Вращающееся поле с таким распределением, не изменяя своей формы и величины, движется по окружности статора с равномерной скоростью, совершая в одну минуту, согласно равенству (1), число оборотов

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad [об/мин],$$

где p — число пар его полюсов и f — частота создающего его тока.

При этом можно считать, что в каждой точке окружности в любой момент времени индукция распределена совершенно равномерно по всей длине l, принимаемой в расчете; как было указано выше, при отсутствии поперечных вентиляционных каналов в сердечнике машины эта длина равна его действительной длине $L_п$.

Если развернуть внутреннюю поверхность статора в плоскость, то движение поля по ней можно будет представить, как это изображено на рис. 46, для нескольких равноотстоящих моментов времени; характер изменения индукции в отдельных точках отмечен маленькими стрелками.

Рис. 46. Перемещение вращающегося поля вдоль окружности расточки статора.

В количественном отношении всякое магнитное поле, в том числе и вращающееся, оценивается так называемым **магнитным потоком** Ф, который тем

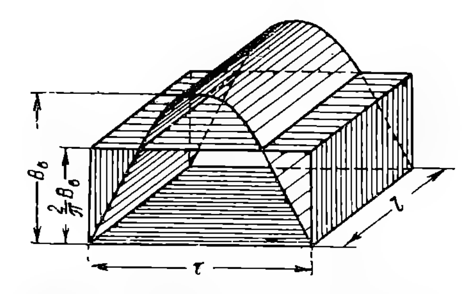


Рис. 47. Определение величины магнитного потока по наибольшему значению индукции.

больше, чем выше наибольшая индукция и чем больше площадь, по которой распределено поле на каждом из полюсных делений. Единица для измерения магнитного потока носит название **максвелл** [*мкс*].

Если бы поле было распределено в пределах каждого полюсного деления вполне равномерно, с одним и тем же значением индукции B во всех точках, то магнитный поток Ф в максвеллах был бы равен произведению этой индукции в гауссах на площадь в квадратных сантиметрах, по которой она распределена на каждом полюсном делении, т. е. на площадь поперечного сечения зазора $Q_в$, определяемую по формуле (6):

$$Ф = BQ_в \quad [мкс].$$

Но при всяком ином распределении индукции по площади для определения величины магнитного потока следует сначала найти среднее значение индукции на этой площади. В частности, если индукция распределена по окружности синусоидально с наибольшим

значением $B_в$, а вдоль длины сердечника равномерно, то на основании свойств синусоиды среднее значение ее по всей площади $Q_в$ будет меньше этого наибольшего в $\frac{\pi}{2}$ раз. Таким образом, магнитный поток окажется равным (рис. 47):

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_в Q_в = \frac{2}{\pi} B_в \tau l \ [мкс], \tag{14}$$

или же

$$B_в \tau l = \frac{\pi}{2} \Phi \ [мкс]. \tag{15}$$

Если в движущемся магнитном поле располагается проводник, перпендикулярный к направлению движения поля и к направлению самого поля, то в нем наводится электродвижущая сила; всякое ее мгновенное значение e будет тем больше, чем выше в этот момент значение индукции B в том месте, где этот проводник находится, чем больше скорость движения v этого поля относительно проводника и чем больше его длина l:

$$e = Bvl.$$

Если индукция выражена в гауссах, скорость в сантиметрах в секунду и длина в сантиметрах, то для того чтобы получить результат в вольтах, необходимо разделить правую часть этого равенства на 100 000 000 (сто миллионов) или, что все равно, умножить ее на 10^{-8} В частности, отсюда следует, что изменение электродвижущей силы во времени должно подчиняться тому же закону, по которому распределено поле в пространстве. Чтобы получить наибольшее значение этой электродвижущей силы $E_{макс}$, следует, очевидно, в правую часть подставить не какое-нибудь, а именно наибольшее значение индукции $B_в$

$$E_{макс} = B_в v l \cdot 10^{-8} \ [в]. \tag{16}$$

Если речь идет о проводнике, находящемся во вращающемся поле на внутренней поверхности статора с диаметром D, то скорость движения поля будет равна:

$$v = \frac{\pi D n_0}{60} \ [см/сек],$$

или, подставляя сюда значение n_0 из равенства (1):

$$v = \frac{\pi D f}{p} \ [см/сек].$$

Но так как на основании определения полюсного деления τ из равенства (4)

$$\frac{\pi D}{2p} = \tau \ [см],$$

то можно написать для скорости движения вращающегося поля такое простое выражение:

$$v = 2\tau f \; [см/сек].$$

Если это подставить в выражение для наибольшего значения электродвижущей силы (16), то получится:

$$E_{макс} = 2B_{в}\tau l f \cdot 10^{-8} \; [в];$$

но на основании равенства (15)

$$E_{макс} = \pi \Phi f \cdot 10^{-8} \; [в].$$

Обычно в технике переменных токов измеряются не наибольшие значения переменных величин, а действующие, которые при синусоидальном изменении переменных величин меньше наибольших в $\sqrt{2}$ раз. Заменяя в последнем равенстве наибольшее значение электродвижущей силы $E_{макс}$ ее действующим значением E, окончательно получаем:

$$E = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \Phi f \cdot 10^{-8} \; [в], \tag{17}$$

т. е. действующее значение синусоидально изменяющейся переменной электродвижущей силы в проводнике, находящемся в синусоидально распределенном вращающемся поле, пропорционально магнитному потоку этого поля и частоте и не зависит от числа пар полюсов этого поля.

Такую электродвижущую силу вращающееся поле наводит в каждом проводнике обмотки статора, создающей это поле.

Если бы все w витков, составляющих каждую фазу обмотки статора, находились по отношению к полю в одном и том же положении, например если бы они лежали в одной паре пазов, отстоящих друг от друга на расстоянии одного полюсного деления, то во всех проводниках, составляющих эти витки, электродвижущая сила одновременно достигала бы наибольшего значения и одновременно обращалась бы в нуль, чтобы затем переменить направление на обратное. Тогда величина ее действующего значения во всей фазе при последовательном соединении всех витков была бы в w раз больше той, которую дает равенство (17).

Но так как витки обмотки разложены в пазы, смещенные по окружности друг относительно друга, то электродвижущие силы в них, как говорят, сдвинуты друг относительно друга по фазе: они достигают наибольшего значения раньше в проводниках тех пазов, которые лежат со стороны набегания поля, и позже в тех, которые находятся со стороны его сбегания (рис. 48).

Поэтому действующее значение электродвижущей силы E всех $2w$ проводников превосходит его величину в одном проводнике не в $2w$ раз, а только в $2kw$ раз, где k есть некоторый коэффициент, зависящий от устройства обмотки и всегда меньший

единицы; он носит название **обмоточного коэффициента**.

Таким образом, действующее значение электродвижущей силы в каждой фазе обмотки равно:

$$E = 2\frac{\pi}{\sqrt{2}}\,kw\Phi f\cdot 10^{-8} = 4{,}44kw\Phi f\cdot 10^{-8}\ [в]. \qquad (18)$$

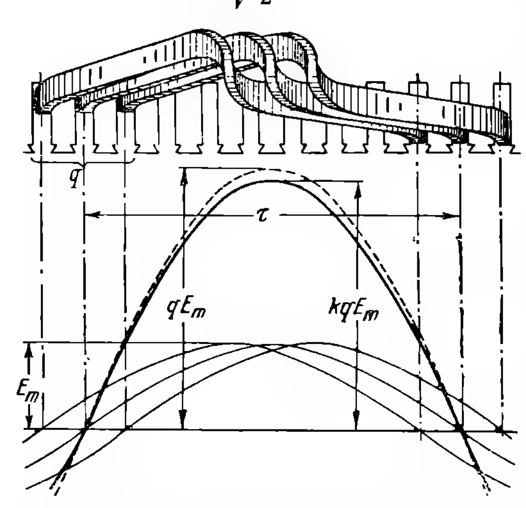


Рис. 48. Определение понятия об обмоточном коэффициенте.

В частности, при частоте $f = 50$ *гц*,

$$E = 222kw\Phi\cdot 10^{-8}[в]. \qquad (18а)$$

Значения обмоточных коэффициентов для всех употребительных чисел пазов на полюс и фазу и шагов даны в таблице приложения V. Не останавливаясь на правилах вычисления этих коэффициентов, можно лишь указать, что по мере укорочения или удлинения шага в двухслойных и цепных обмотках значения обмоточных коэффициентов убывают сначала немного, но затем все заметнее.

Отсюда можно сделать вывод, что применение слишком коротких или слишком длинных шагов невыгодно, так как при прочих равных условиях понижает величину электродвижущей силы, наведенной в обмотке.

11. Расчет числа витков обмотки статора

Напряжение, приложенное к обмотке статора, может уравновешиваться не только падением напряжения на ее сопротивлениях (активном и индуктивном), но и той электродвижущей силой, которая наводится в ней вращающимся магнитным полем, созданным ею же самой.

Во время нормальной работы машины почти все приложенное напряжение уравновешивается именно этой электродвижущей силой, которая направлена **против** приложенного напряжения; таким образом, она играет здесь примерно такую же роль, как противоэлектродвижущая сила в якоре двигателя постоянного тока: роль противодействия, которое машина оказывает действию напряжения сети, ее питающей.

Только очень небольшая часть напряжения идет при этом на преодоление падения напряжения в обмотке. Для малых и сред-

них асинхронных двигателей можно считать с достаточной точностью, что электродвижущая сила E, наведенная в обмотке при номинальной нагрузке, равна примерно 0,97 приложенного напряжения U.

Это обстоятельство дает отправную точку для расчета числа витков в обмотке статора. Если решить равенство (18) относительно числа витков w и подставить вместо электродвижущей силы указанную часть приложенного напряжения

$$E \approx 0{,}97\ U\ [в],$$

то получится:

$$w = \frac{0{,}97U}{4{,}44k\,\Phi\, f \cdot 10^{-8}} = \frac{0{,}219U\ \ 10^{8}}{k\,\Phi\, f}. \tag{19}$$

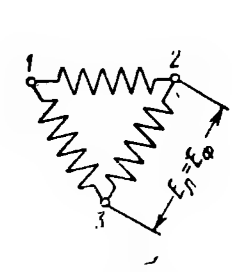


Рис. 49. Сопряжение фаз в треугольник.

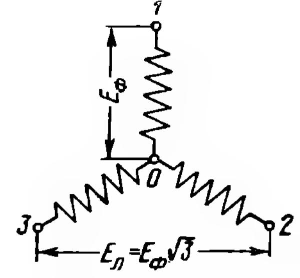


Рис. 50. Сопряжение фаз в звезду.

Если решить это равенство относительно магнитного потока Ф, то получится:

$$\Phi = \frac{0{,}219\,U\ \ 10^{8}}{kfw}\ [мкс]. \tag{20}$$

В таком виде оно нам понадобится в дальнейшем.

Необходимо оговорить, что следует понимать под приложенным напряжением U. Электродвижущая сила в равенстве (18) есть ф а з н а я величина, между тем как под напряжением сети понимается л и н е й н о е (междуфазное) его значение. Если предполагается, что фазы обмотки статора при работе машины от сети с данным линейным напряжением будут сопряжены в т р е у г о л ь н и к, то фазная электродвижущая сила будет в то же время и линейной (рис. 49); тогда за величину U в равенстве (19) прямо может быть принято это линейное напряжение. Но если сопряжение фаз обмотки статора должно быть произведено в з в е з д у, то E будет (в $\sqrt{3}$ раз меньше необходимой линейной величины электродвижущей силы (рис. 50). Для того чтобы не нарушать общности равенства (19) введением в него дополнительного множителя, следует условиться раз навсегда считать, что U есть ф а з н о е напряжение (в $\sqrt{3}$ раз меньшее заданного линейного, если обмотка сопряжена в звезду).

Современные мелкие и средние машины в огромном большинстве случаев строятся на работу при двух напряжениях: 380 *в* при сопряжении фаз статора в звезду и 220 *в* при сопряжении их в треугольник, что обычно записывается в их заводских щитках так: «△/⅄ 220/380 *в*» или просто «220/380 *в*». Применявшиеся раньше напряжения 127/220 *в* в настоящее время встречаются редко; что касается напряжения 500 *в*, имевшего в свое время довольно широкое применение, то оно также выходит из употребления, уступая место либо напряжению 380 *в*, либо высокому напряжению — 3000 или даже 6000 *в*.

Для обычного значения частоты $f = 50$ *гц* и фазного напряжения 220 *в* равенство (19) может быть переписано упрощенно:

$$w = \frac{0{,}219 \cdot 220 \cdot 10^8}{k\Phi \cdot 50} = \frac{0{,}96 \cdot 10^8}{k\Phi}. \quad (19а)$$

В частности, если предполагается применить катушечную обмотку или цепную обмотку с диаметральным шагом, то можно воспользоваться тем, что обмоточный коэффициент для всех таких обмоток весьма близок к 0,96; тогда последнее равенство принимает замечательно простой вид:

$$w = \frac{10^8}{\Phi}. \quad (19б)$$

Однако все же искомый ответ еще не получен: число витков выражено через некоторые постоянные для данной обмотки величины и магнитный поток, но последний пока остается неизвестным. Расчет привел к неопределенности: выходит, что число витков может быть каким угодно, стоит лишь иметь в машине соответствующий поток. Однако поток в каждой данной машине не может быть сколь угодно велик, так как иначе ее сердечник оказался бы перегруженным в магнитном отношении. Но он не может быть и сколь угодно мал, потому что тогда машина будет плохо использована. Очевидно должны существовать какие-то довольно узкие пределы, выработанные практикой, в которых заключается приемлемая величина потока; внутри этих пределов возможно некоторое количество вариантов исполнения, среди которых следует выбрать наиболее удачный. Этот выбор не может быть сделан отвлеченно; он должен опираться на тот опыт, который накоплен практикой постройки асинхронных двигателей.

Кроме того, он стеснен еще тем обстоятельством, что для исполнения обмотки может быть принято не всякое число витков w, а только такое, при котором все ее секции будут одинаковыми, т. е. состоять из одного и того же числа витков; иначе изготовление секций усложнится и удорожит стоимость обмотки.

Общее количество проводников в одной фазе при последовательном соединении всех витков равно $2w$, а во всех трех фазах $3 \cdot 2w = 6w$.

Если разделить это число проводников на общее число пазов Z, то результат деления будет представлять **число проводников в каждом пазу**:

$$s_п = \frac{6w}{Z}.$$

В случае, если обмотка состоит из a параллельных ветвей, каждая из которых имеет w витков, число проводников должно быть увеличено в a раз:

$$s_п = \frac{6wa}{Z}; \qquad (21)$$

отсюда число витков в фазе

$$w = \frac{Zs_п}{6a}. \qquad (22)$$

Условием пригодности данного числа витков w является **целое** значение $s_п$; кроме того, при двухслойной обмотке оно должно быть еще и **четным**, а при полуоткрытых пазах (рис. 36) — кратным четырем.

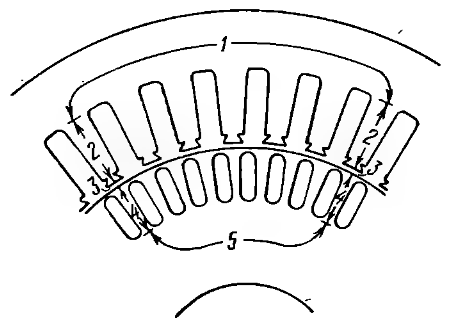


Рис. 51. Пять частей магнитной цепи асинхронной машины.

Для того чтобы получить основание для выбора числа витков, следует обратиться к магнитной цепи машины и рассмотреть условия существования магнитного потока в каждой из ее частей в отдельности.

В асинхронной машине можно различить всего пять таких частей (рис. 51):

1) тело статора;
2) зубцы статора;
3) воздушный зазор между статором и ротором;
4) зубцы ротора;
5) тело ротора.

Что касается зазора, то равенством (14) уже была установлена связь между магнитным потоком и наибольшей индукцией в зазоре; остается только решить это равенство относительно индукции:

$$B_в = \frac{\pi}{2} \quad \frac{\Phi}{Q_в} = 1{,}57 \frac{\Phi}{Q_в} \; [гс]. \qquad (23)$$

В удачно построенных двигателях малой и средней мощности наибольшая индукция в зазоре обычно колеблется в пределах от 5000 до 9000 *гс*. Чем машина больше и чем лучше она вентилируется, тем и индукция в ее зазоре выше; самые низкие значения приходится брать для закрытых машин.

К зазору примыкают с одной стороны слой зубцов статора с площадью сечения $Q_з$, а с другой — слой зубцов ротора с пло-

щадью сечения $Q'_з$. Если бы индукция в зазоре была распределена равномерно по всей площади его сечения $Q_в$, то в зубцах статора и ротора индукция также была бы равномерной, и значение ее могло бы быть получено делением потока на соответствующую площадь.

Однако на самом деле индукция в зазоре распределена примерно синусоидально; следовательно, и между отдельными зубцами поток распределяется не поровну, а так, что наибольшая индукция оказывается в зубцах, находящихся в данный момент против мест с наибольшей индукцией в зазоре. Поэтому не будет ошибкой считать, что между потоком и наибольшей индукцией в зубцах $B_з$ существует такое же соотношение, какое имеет место в зазоре:

$$B_з = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Phi}{Q_з} = 1{,}57 \frac{\Phi}{Q_з} \; [гс]. \tag{24}$$

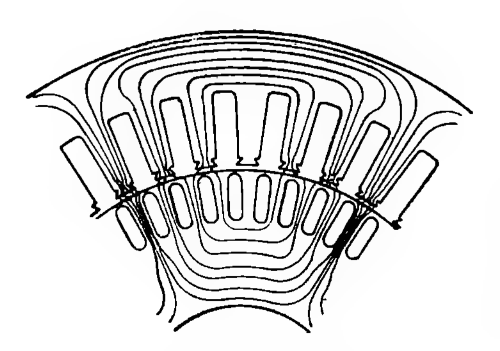


Рис. 52. Распределение магнитного потока в асинхронной машине.

Желательно, чтобы индукция в зубцах статора не выходила из пределов 14 000—16 000 *гс;* только в очень тихоходных двигателях она может достигать 17 000 — 18 000 *гс*. Что касается зубцов ротора, то в них, как правило, индукция берется несколько меньшей; во всяком случае она не может являться решающим мерилом при расчете.

Пройдя слой зубцов статора, поток распределяется по телу статора в двух направлениях (рис. 52). С достаточной степенью точности можно считать, что в тех местах, где индукция в теле статора достигает наибольшего значения, она распределяется по всему его сечению $Q_с$ вполне равномерно; отсюда следует, что между потоком и наибольшей индукцией в теле статора существует соотношение:

$$B_с = \frac{\Phi}{2Q_с} \; [гс]. \tag{25}$$

Нормальными пределами для наибольшей индукции в теле статора следует считать 12 000—14 000 *гс;* однако для тихоходных двигателей она нередко спускается значительно ниже, а для быстроходных, в особенности двухполюсных, иногда приходится допускать ее значения до 16 000—17 000 *гс* и даже выше, что, впрочем, нельзя считать нормальным; это может быть терпимо лишь в виде исключения для отдельных редких случаев.

Подобное же соотношение будет иметь место и для наибольшей индукции в теле ротора:

$$B_р = \frac{\Phi}{2Q_р} \ [гс]; \tag{26}$$

обычно она значительно меньше, чем $B_с$, и подобно индукции в зубцах ротора не имеет решающего значения при расчете.

Установив эти соотношения, можно посредством проб подобрать несколько чисел витков и соответствующих им величин потоков, затем произвести расчет получающихся при этом индукций в различных частях магнитной цепи и после этого остановить выбор на том из вариантов, который представляется наиболее благоприятным.

Пример 6. Требуется определить число витков обмотки статора четырехполюсного двигателя мощностью 6,8 *квт* на напряжение 220/380 *в* с короткозамкнутым ротором, залитым алюминием; число пазов на статоре 36, обмотка должна быть цепная с диаметральным шагом.

Обмер сердечника статора дал следующие сечения:

Сечение зазора	$Q_в = 176{,}0$ *см*²
» зубцов статора	$Q_з = 64{,}4$ »
» тела статора	$Q_с = 25{,}4$ »

Обмеру сердечника ротора препятствует литая обмотка.

Начнем с того, что испробуем наудачу значение индукции в зазоре $B_в = 6500$ *гс*, что представляется вполне нормальной величиной для машины такой мощности. Тогда поток будет:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_в Q_в = \frac{2}{3{,}14} 6500 \cdot 176 = 730\,000 \ [мкс].$$

Число витков здесь может быть подсчитано по формуле (19б)

$$w = \frac{10^8}{\Phi} = \frac{10^8}{730\,000} = 137.$$

Но условие пригодности числа витков, данное равенством (21), требует, чтобы результат деления его на

$$\frac{Z}{6} = \frac{36}{6} = 6$$

был целым числом; таким образом, для расчета в данном случае пригодны только числа витков, кратные шести.

Ближайшим таким числом является $138 = 6 \cdot 23$; теперь следует подсчитать индукции в различных частях магнитной цепи как для этого числа витков, так и для нескольких ближайших к нему чисел как в меньшую, так и в бóльшую сторону:

$$132 = 6 \cdot 22; \quad 144 = 6 \cdot 24.$$

Результаты этих подсчетов удобно представить в виде таблицы:

Число витков		w	132	138	144
Поток		$\Phi = \frac{10^8}{w} = 10^6 \times$	0,758	0,725	0,695
Индукции	в зазоре	$B_в = \frac{1{,}57\Phi}{176{,}0} = \frac{\Phi}{112} =$	6770	6470	6210
	в зубцах статора	$B_з = \frac{1{,}57\Phi}{64{,}4} = \frac{\Phi}{41} =$	18 500	17 700	16 950
	в теле статора	$B_c = \frac{\Phi}{2 \cdot 25{,}4} = \frac{\Phi}{50{,}8} =$	14 900	14 300	13 700

Двумя наилучшими являются варианты с 132 и 138 витками. Если бы обмотка была двухслойной, вариант с 138 витками отпал бы, так как при нем число проводников в пазу нечетно. Вообще же этот вариант удачнее, и если при подсчете сечения проводника окажется, что обмотка не очень сильно стеснена в пазу, то предпочтение следует отдать имённо ему, так как при 132 витках индукция в зубцах статора выходит из рекомендованных пределов.

Пример 7. Для сравнения пересчитаем эту же машину на шестиполюсную обмотку; тогда сечения зазора и зубцов будут составлять только $^2/_3$ от указанных, т. е.

$$Q_в = \frac{2}{3} \cdot 176 = 117{,}3\ см^2; \quad Q_з = \frac{2}{3}\ 64{,}4 = 42{,}9\ см^2.$$

При том же самом значении индукции для первой пробы $B_в = 6500$ *гс* поток получается:

$$\Phi = \frac{2}{3{,}14} \cdot 6500 \cdot 117{,}3 = 487\,000\ мкс.$$

что дает число витков:

$$w = \frac{10^8}{487\,000} = 205.$$

Ближайшим кратным шести является $204 = 6 \cdot 34$; возьмем еще в добавление к нему числа:

$$192 = 6 \cdot 32; \quad 216 = 6 \cdot 36.$$

Составляем таблицу по образцу предыдущей:

			192	204	216
Число витков		w	192	204	216
Поток		$\Phi = \frac{10^8}{w} = 10^6 \times$	0,521	0,490	0,463
Индукции	в зазоре	$B_в = \frac{1,57\,\Phi}{117,3} = \frac{\Phi}{75} =$	6950	6530	6170
	в зубцах статора	$B_з = \frac{1,57\,\Phi}{42,9} = \frac{\Phi}{27,3} =$	19 100	17 950	16 950
	в теле статора	$B_с = \frac{\Phi}{2 \cdot 25 \cdot 4} = \frac{\Phi}{50,8} =$	10 250	9650	9100

Здесь явно следует отдать предпочтение вариантам с меньшими числами витков; так, в варианте с 204 витками индукция в зубцах хотя и лежит на границе рекомендованной, но индукция в теле статора настолько низка, что возникает вопрос, не отдать ли предпочтение даже варианту с 192 витками; и в этом случае окончательное решение может зависеть от дальнейшего хода расчета.

Пример 8. Совершенно иная картина получится, если попытаться пересчитать эту же машину на двухполюсную обмотку. В этом случае сечения зазора и зубцов удваиваются по сравнению с четырехполюсным исполнением:

$$Q_в = 2 \cdot 176 = 352 \text{ см}^2; \quad Q_з = 2 \cdot 64,4 = 128,8 \text{ см}^2.$$

Здесь нечего и пытаться производить пробу при той индукции в зазоре, которая принималась в первых двух случаях; возьмем только 60% от нее — примерно 3900 *гс*. Тогда поток

$$\Phi = \frac{2}{3,14}\ 3900\ 352 = 880\,000 \text{ мкс}$$

и число витков

$$w - \frac{10^8}{880\,000} = 113.$$

Ближайшим кратным шести является $114 = 6 \cdot 19$. Добавляем сюда еще:

$$108 = 6 \cdot 18; \quad 120 = 6 \cdot 20$$

и составим опять таблицу вариантов:

Число витков		w	108	114	120
Поток		$\Phi = \frac{10^8}{w} = 10^6 \times$	0,927	0,878	0,833
Индукции	в зазоре	$B_в = \frac{1,57\,\Phi}{352} = \frac{\Phi}{224} =$	4140	3920	3720
	в зубцах статора	$B_з = \frac{1,57\,\Phi}{128,8} = \frac{\Phi}{82,2} =$	11 300	10 700	10 150
	в теле статора	$B_c = \frac{\Phi}{2\cdot 25,4} = \frac{\Phi}{50,8} =$	18 250	17 300	16 400

Если в предыдущем случае индукции в теле статора получались очень низкими, то с этим можно было еще мириться потому, что в зазоре и в зубцах они имели нормальные значения; здесь же, напротив, даже при намеренно заниженных индукциях в зазоре и зубцах, индукции в теле статора выходят из границ допустимых. По существу ни один из этих вариантов не хорош; следовательно, намотка этого двигателя на два полюса по возможности должна быть отклонена. В крайнем случае при наличии острой необходимости пришлось бы остановиться на варианте с 120 или, крайнее, с 114 витками.

12. Расчет сечения проводника при мягких секциях обмотки статора

Когда число витков обмотки статора выбрано, следующим этапом расчета является определение размеров проводника, в первую очередь его поперечного сечения. Метод этого определения зависит от формы паза статора примерно в такой же степени, в какой от нее зависит выбор типа обмотки.

Применяемые формы полузакрытых пазов статора при всем их разнообразии можно разбить на две основные группы, как это сделано в таблице приложения I: пазы трапециевидной формы и пазы с параллельными стенками.

При полузакрытых пазах трапециевидной формы нельзя заложить обмотку ни в виде жестких секций, ни по способу прошивания, а только лишь путем «всыпания» мягких секций через отверстие паза. Понятно, что ни о каком порядке в расположении проводников здесь не может быть речи; они распределяются по сечению паза совершенно беспорядочно, местами перекрещиваясь друг с другом и оставляя незаполненные полости. Поэтому для определения размеров сечения проводника нужно обратиться к опытным данным, показывающим, какая часть сечения паза может быть использована проводниками. Ввиду того что пазы трапециевидной формы всегда невелики по размерам, изоляция их должна быть

очень тонкой, а потому изготовляется из высококачественных изоляционных материалов; в нормальных двигателях малой мощности — примерно от 0,5 до 5 *квт* — толщина всей изоляции паза не должна превосходить 0,45—0,5 *мм*, а в самых мелких машинах, как, например, двигателях для электродрелей и т. п., она должна быть еще тоньше — порядка 0,25—0,3 *мм*; и только в машинах выше 8—10 *квт* можно применять более толстую изоляцию — до 0,8 *мм*.

Наиболее типичен трехслойный состав изоляции, каждый из слоев которой выполняет свое специальное назначение (рис. 53).

Первый слой, самый близкий к стенкам паза, должен защищать содержимое паза от повреждений при укладке; для него применяется тонкий, но прочный электротехнический или другой подобный картон; возможно также применение жесткой тряпичной чертежной бумаги. Толщина этого слоя в среднем берется около 0,15 *мм*.

В качестве второго слоя применяется тонкая и ровная лакоткань толщиной 0,15—0,20 *мм*; ее механическая прочность невелика, но электрическая — очень значительна; она собственно и является главной изоляцией паза. В самых мелких двигателях приходится применять шелковую лакоткань толщиной всего лишь около 0,1 *мм*. В более крупных пазах овальной формы вместо лакоткани может быть применен микафолий толщиной 0,18—0,25 *мм*; его изолирующие свойства очень хороши, но недостатком является легкая повреждаемость при выходе из паза; для пазов трапециевидной формы со слабо закругленными углами его лучше не применять.

Наиболее подходящим материалом для третьего — внутреннего — слоя изоляции паза является гладкий и скользкий лощеный электротехнический картон; назначение этого слоя — предохранять основную изоляцию от повреждений изнутри, способствовать укладке проводников и защищать их от обдирания о края паза. Ширина полосы, из которой приготовляется этот слой, берется настолько большой, чтобы оба ее края выступали из отверстия паза примерно на 10 *мм*, в то время как первые два слоя должны немного не доходить до краев паза. По этой причине последний слой изоляции называют «проходной коробкой». Толщина его может быть взята минимальной — соответственно самому тонкому из имеющихся сортов лощеного электротехнического картона — порядка 0,15 *мм* и ниже.

При отсутствии лакоткани можно ограничиться двухслойной изоляцией, взяв для первого слоя электротехнический картон толщиной 0,25—0,35 *мм*; но обойтись без проходной коробки крайне трудно.

Можно считать нормальным, чтобы изоляция паза занимала примерно 15—20% его площади; при двухслойной обмотке еще около 5% площади паза отходит на долю междуслойной прокладки. Кроме того, некоторую часть площади паза отнимает клин, закрывающий его отверстие; в небольших пазах она может доходить до 8—12%.

Таким образом, на долю обмотки остается примерно 65—75% площади сечения паза. Практика показывает, что фактически обмотка со своей изоляцией использует только около половины этой площади; если же считать на чистое сечение меди, то эта доля еще значительно понижается.

Это происходит потому, что проводники мягких секций при всыпании в пазы располагаются в беспорядке; особенно плохо они заполняют углы пазов, а также углы, образующиеся поверх междуслойной прокладки при двухслойной обмотке. Примерный вид того, что получается в пазу, представлен на рис. 54.

Опыт постройки очень большого количества мелких и средних асинхронных двигателей с мягкими секциями показывает, что при

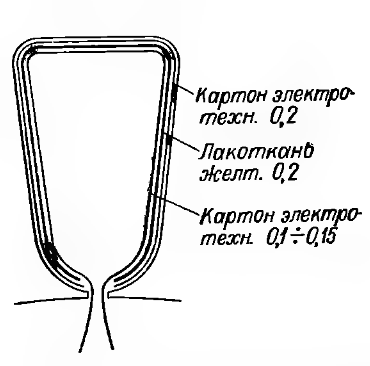


Рис. 53. Типичная изоляция полузакрытого паза при всыпных обмотках.

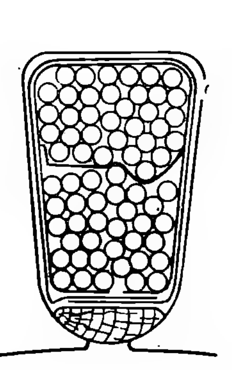


Рис. 54. Трапециевидный паз всыпной обмотки.

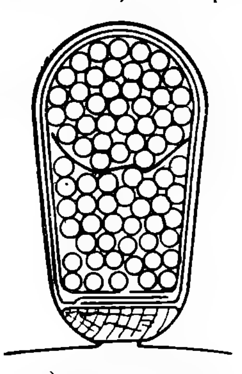


Рис. 55. Закругленный (овальный) паз всыпной обмотки.

трапециевидных пазах с углами, хотя бы и закругленными, для двухслойной обмотки удается занять проводниками с их изоляцией примерно лишь от 33 до 40% общей площади сечения паза, причем нижняя цифра относится к машинам до 0,5 *квт*, а верхняя — до 15—30 *квт*. Отношение суммы сечений всех $s_п$ проводников в пазу вместе с их изоляцией к общей площади паза $q_п$ носит название коэффициента заполнения паза $f_п$.

Если обозначить через q' площадь поперечного сечения одного проводника с его изоляцией, выраженную в квадратных миллиметрах, и через a' — число параллельных сечений, то для коэффициента заполнения паза можно будет написать такое выражение:

$$f_п = \frac{s_п q' a'}{q_п}$$

Следовательно, зная площадь паза и задавая подходящее значение коэффициента заполнения, можно получить сечение проводника с его изоляцией:

$$q' = \frac{q_п f_п}{a' s_п} \quad [мм^2], \qquad (27)$$

откуда его диаметр с изоляцией:

$$d' = \sqrt{\frac{4q'}{\pi}} \quad [\textit{мм}].$$

Стремление повысить коэффициент заполнения паза привело к применению пазов без углов — овальной формы, с очертанием дна по дуге окружности, плавно сопрягающейся с прямыми линиями боковых стенок (рис. 55); это дает заметный выигрыш в коэффициенте заполнения паза, доводя его значение до 0,37—0,45. Дальнейший выигрыш получается за счет применения цепной обмотки взамен двухслойной; он примерно равноценен предыдущему и дает в трапециевидных пазах с углами значения коэффициента заполнения 0,37—0,45, а при закругленном дне паза даже до 0,42—0,50.

Однако, несмотря на преимущества пазов овальной формы, современное передовое электромашиностроение проявляет стремление возвратиться к пазам трапециевидной формы с совершенно незакругленными углами подобно рис. 4 приложения I; это объясняется применением штампов, составленных из брусков, что очень удешевляет их изготовление и заставляет мириться с заметным понижением коэффициента заполнения паза.

Понятно, что в таких условиях приходится применять обмоточный проводник с как можно более тонкой изоляцией. Из всех существующих видов изоляции наиболее подходящей для этой цели является органическая эмаль; поэтому проводники с эмалевой изоляцией получили в небольших машинах самое широкое применение.

Эмалевая изоляция очень тонка, мало гигроскопична и весьма теплопроводна; но недостатком ее является невысокая механическая прочность — она довольно легко сцарапывается с поверхности проводника; поэтому проводники с одной эмалевой изоляцией могут применяться для обмоток только при очень высоких механических качествах эмали; в противном случае их необходимо покрывать защитным слоем, например хлопчатобумажной пряжей.

Наибольшее распространение получил проводник с изоляцией марки ПЭЛБО (эмалированный с одним слоем хлопчатобумажной пряжи).

Для очень мелких двигателей можно рекомендовать применение проводника марки ПЭЛШО (эмалированный с одним слоем шелковой пряжи), так как его изоляция примерно в $1^1/_2$ раза тоньше, чем изоляция проводника ПЭЛБО того же диаметра.

В таблице приложения III даны нормальные диаметры проводников круглого сечения; там же указаны площади поперечного сечения их чистой меди.

Эмалированные проводники изготовляются начиная от самых малых диаметров и до диаметров порядка 2 *мм*; выше этого приходится применять проводник марки ПБД (с двойной изоляцией из

хлопчатобумажной пряжи); при этом для мягких секций следует избегать применения диаметров выше 2,5 *мм*, так как при них всыпание секций в пазы становится крайне затруднительным. Если сечение проводника слишком велико, лучше подразделить его на два-три и более сечений, соединенных параллельно.

Пример 9. В трапециевидные пазы со слабо закругленными углами двигателя мощностью 6,8 *квт* должна быть уложена двухслойная обмотка с мягкими секциями, состоящая из $w = 132$ витков в каждой фазе. Требуется определить сечение проводника, если общее число пазов $Z = 36$ и площадь паза $q_п = 223{,}6$ *мм*².

Вследствие недостаточно благоприятной формы паза, трудно рассчитывать на коэффициент заполнения выше $f_п = 0{,}39$. Согласно равенству (21), число проводников в одном пазу равно:

$$s_п = \frac{6wa}{Z} = \frac{6 \cdot 132 \cdot 1}{36} = 22.$$

Сечение одного проводника с изоляцией должно быть не больше, чем

$$q' = \frac{q_п f_п}{s_п} = \frac{223{,}6 \cdot 0{,}39}{22} = 3{,}96 \text{ мм}^2.$$

Такое сечение целесообразно подразделить на две части, т. е. принять $a' = 2$.

Отсюда следует, что диаметр проводника с изоляцией

$$d' = \sqrt{\frac{4q'}{a'\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3{,}96}{2 \cdot 3{,}14}} = 1{,}59 \text{ мм}.$$

По таблице нормальных диаметров приложения III подходящим проводником марки ПЭЛБО оказывается проводник диаметра без изоляции $d = 1{,}35$ *мм* и с изоляцией $d' = 1{,}56$ *мм*.

Сечение этого проводника равно:

$$q' = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 1{,}35^2}{4} = 1{,}431 \text{ мм}^2.$$

Если умножить это сечение на число проводников в пазу $a's_п$ и разделить на площадь $q_п$, то окажется, что собственно медь занимает

$$\frac{1{,}431 \cdot 2 \cdot 22}{223{,}6} = 0{,}282,$$

т. е. только 28,2% общей площади паза.

Если теперь изменить тип обмотки, перейдя от двухслойной обмотки к цепной, то вследствие отсутствия междуслойной прокладки в пазу можно будет повысить коэффициент заполнения паза примерно до $f_п = 0{,}43$; тогда сечение одного проводника будет:

$$q' = \frac{223{,}6 \cdot 0{,}43}{22} = 4{,}36 \text{ мм}^2,$$

и если подразделить его опять на две части, то диаметр проводника с изоляцией может быть повышен до

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot 4{,}36}{2 \cdot 3{,}14}} = 1{,}66 \text{ мм}.$$

Это позволяет либо увеличить диаметр меди проводника до 1,45 *мм* (т. е. поднять его через одно сечение по таблице нормальных диаметров) при сохра-

нении марки ПЭЛБО, либо перейти на марку ПБД с одновременным увеличением диаметра меди проводника до 1,40 *мм.*

Однако поскольку последний диаметр является мало употребительным, целесообразно остановиться на первом варианте решения, приняв окончательно проводник ПЭЛБО 1,45/1,66.

Сечение этого проводника по меди согласно таблице равно $q = 1{,}651$ *мм²*; теперь медью занято будет уже

$$\frac{1{,}651 \cdot 2 \cdot 22}{223{,}6} = 0{,}325,$$

или 32,5% площади паза.

13. Расчет сечения проводника при жестких секциях

При открытых прямоугольных пазах, преимущественно применяемых в современных более или менее крупных машинах, наиболее целесообразным является исполнение обмотки с жесткими секциями, которые изготовляются отдельно от машины и укладываются в пазы в законченном виде, вполне изолированные.

Жесткие секции наматываются большей частью из проводника прямоугольного сечения, но могут изготовляться и из проводника круглого сечения. В обоих случаях применяется проводник преимущественно марки ПБД; в последнее время стала входить в употребление также изоляция неорганического происхождения — дельта-асбестон, стеклянная пряжа и т. д., допускающая более высокую температуру во время работы, чем органическая изоляция. Между рядами проводников либо вовсе не кладется при этом никакой дополнительной изоляции, либо укладываются прокладки из полосок тонкого электротехнического картона или миканита, после чего на секцию накладывается общая изоляция. В более крупных машинах, в особенности высокого напряжения (3000 и 6000 *в*), рекомендуется изолировать отдельные витки микалентой или синтолентой.

Различаются два основных способа изолировки жестких секций.

1. Гильзовая изоляция. Пазовые части секции изолируются путем оборачивания их несколькими слоями листового изоляционного материала: электротехнического картона, лакоткани или микафолия, причем листы берутся такой ширины, чтобы сразу покрыть весь изолируемый участок. При этом изоляция считается наложенной в $1^1/_4$ слоя, если с трех сторон она покрывает секцию в один слой, а с четвертой стороны (обычно более узкой) — в два слоя (рис. 56). Для защиты от механических повреждений пазовая часть сверх всего покрывается слоем тонкого, но прочного электротехнического картона.

Лобовые части изолируются отдельно, обычно раньше пазовых, путем наложения нескольких рядов полосовых изоляционных материалов: хлопчатобумажной ленты различных наименований, лаколенты или микаленты. Применяются два основных способа наложения рядов ленты:

а) впритык — когда витки ленты примыкают друг к другу своими краями; односторонняя толщина такого ряда равна толщине ленты (рис. 57);

б) вполнахлеста — когда каждый следующий виток перекрывает предыдущий ровно до половины ширины; односторонняя толщина ряда при этом равна удвоенной толщине ленты (рис. 58).

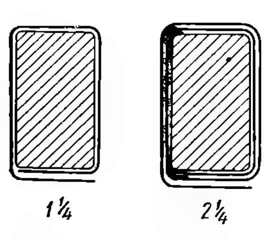


Рис. 56. Наложение изоляции из листовых материалов.

В обоих случаях поверх всего накладывается один ряд хлопчатобумажной ленты вполнахлеста для защиты внутренних рядов изоляции. После наложения изоляции она подвергается пропитке, что вызывает увеличение ее толщины или «разбухание» примерно на 30%. Таким образом, в этом способе изоляция пазовых и лобовых частей различна как по составу, так и по устройству.

2. *Непрерывная изоляция.* И пазовая, и лобовая части изолируются совершенно одинаково — путем непрерывного наложения полосовых изоляционных материалов в несколько рядов; лишь число рядов в лобовой части берется несколько меньшим, чем в пазовой.

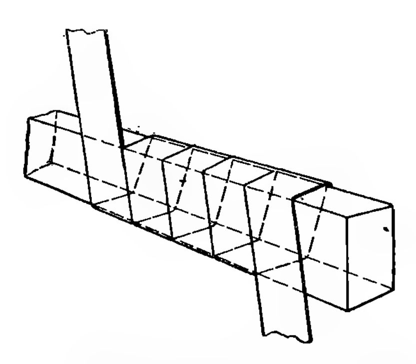


Рис. 57. Наложение изоляции из полосовых материалов впритык.

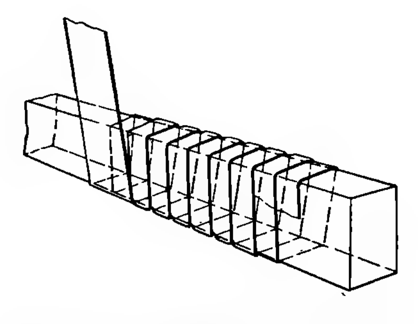


Рис. 58. Наложение изоляции из полосовых материалов вполнахлеста.

Для этого способа изоляции наиболее типично применение микаленты; однако возможно выполнение ее и лаколентой для всех напряжений до 6000 *в* включительно.

Для защиты от механических повреждений и пазовая, и лобовая части покрываются в один ряд хлопчатобумажной лентой.

Так как при наложении рядов микаленты применяется обильная подмазка лаком, суммарная толщина непрерывной изоляции получается больше суммы толщин образующих ее рядов микаленты; величина этого утолщения зависит от сорта подмазочного лака

и числа рядов ленты: оно тем меньше, чем меньше вязкость лака и чем больше число рядов.

В процессе изготовления непрерывная изоляция подвергается опрессовке в расплавленной битумной массе, создающей всестороннее давление на пазовые и на лобовые части, в результате чего из них удаляются все воздушные прослойки и изоляция уплотняется. Эта операция носит название компаундирования.

Непрерывная изоляция значительно совершеннее гильзовой, так как прежде всего не имеет слабого места последней — стыка изоляции пазовой и лобовой частей; но ее наложение более трудоемко, стоимость материалов выше, и она требует применения сложного оборудования для компаундирования.

Для машин с напряжением до 500 *в* зачастую применяется упрощенная изоляция, которую нельзя отнести ни к одной из описанных; именно, пазовая и лобовая части покрываются одним-двумя рядами полосовых изоляционных материалов, в том числе последний ряд — наружный — обязательно должен состоять из хлопчатобумажной ленты; после пропитки пазовые части таких секций изолируются $1^{1}/_{4}$—$2^{1}/_{4}$ слоями листовых материалов — электротехнического картона и лакоткани.

Между слоями двухслойной обмотки обязательно кладется прокладка из твердого картона относительно большой толщины; для заполнения зазора на укладку по высоте и для облегчения вдвигания клина применяются прокладки из картона по месту под клин, закрывающий паз; зачастую кладутся прокладки также на дно паза для защиты секций от повреждений при осаживании в паз.

В приложении VI даны образцы изоляции секций, рекомендуемые для применения; там же указаны толщины, которые должны иметь слои изоляции, а также зазоры, которые необходимо давать для возможности вкладывания секций как по ширине паза, так и по высоте.

При кустарном производстве секций низкого напряжения для изоляции пазовой части нередко применяется обматывание ее несколькими слоями хлопчатобумажной ленты, а при отсутствии ее — нарезанной на полоски хлопчатобумажной ткани разных сортов. Такой способ изоляции пазовой части нельзя признать удачным, поскольку изоляция подобного рода очень мало теплопроводна; кроме того, крайне трудно добиться равномерности ее толщины, вследствие чего для укладки изолированных таким образом секций приходится давать очень большие зазоры по ширине и высоте паза — не менее, чем двойные против нормальных. В крайнем случае, если избежать ее применения нельзя из-за отсутствия более подходящих изоляционных материалов или приспособлений для опрессовки, хотя бы и примитивных, нужно при укладке выстилать внутренность паза тонким электротехническим картоном (лучше всего лощеным) с тем, чтобы вкладываемые секции не за-

дирались о края и стенки паза; следует обязательно производить пропитку этой изоляции пропиточными лаками.

В приложении IV дана таблица нормальных размеров обмоточных проводников прямоугольного сечения; там же указаны толщины их изоляции различных марок. Площади сечений, указанные в таблице, меньше произведения их сторон, потому что имеют закругления по углам, так как иначе проводники легко прорезали бы свою изоляцию.

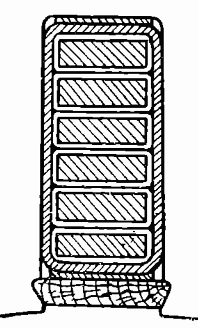


Рис. 59. Расположение проводников прямоугольного сечения в пазу.

Потери от вихревых токов в проводниках обмотки статора возрастают пропорционально четвертой степени высоты проводника в пазу; поэтому проводники жестких секций, имеющие прямоугольное сечение, следует класть более широкой стороной сечения по ширине паза, а более узкой — по высоте, т. е. производить намотку секций плашмя (рис. 59) в отличие от обмоток якорей машин постоянного тока и фазовых роторов асинхронных машин, в которых проводники в секциях располагаются стоймя. Желательно избегать проводников с сечениями, форма которых близка к квадрату, так как при намотке секций такие проводники склонны закручиваться, что ведет к высокому браку секций.

Если количество витков в секции настолько велико, что они не могут быть уложены в один ряд, как на рис. 59, то в крайних случаях приходится прибегать к двухрядной укладке; при этом могут быть применены два способа чередования проводников: по высоте (рис. 60, *а*) и ступенчатый (рис. 60, *б*). Первый из них удобнее тем, что не дает перекрещивания витков в лобовых частях; зато он имеет тот недостаток, что при нем входной и выходной витки секции лежат рядом, и потому между ними существует полное напряжение секции, в то время как во втором способе напряжения между соседними витками составляют лишь небольшую часть всего напряжения секции. Поэтому при первом способе приходится применять прокладку между рядами, в то время как при втором надобности в такой прокладке не встречается.

Если изолированного проводника нет, то при низких напряжениях можно применить голый проводник прямоугольного сечения, изолируя витки через один хлопчатобумажной лентой вполнахлеста; при этом те проводники, которые ложатся на самый низ и на самый верх паза, должны быть обязательно изолированы (рис. 61). Наложение изоляции производится вручную, что требует много рабочего времени, и изоляция занимает много места в пазу; однако в ряде случаев это может служить единственным выходом из положения.

При отсутствии проводника подходящего сечения можно применить два проводника более мелкого сечения (в две параллели);

они должны располагаться в пазу рядом, но не друг над другом; однако при этом пропадает часть места в пазу, которая занимается изоляцией проводников по их сторонам, обращенным друг к другу. К подразделению проводника на два, три и более сечений приходится прибегать и в тех случаях, когда его сечение получается настолько большим, что затрудняет намотку секций и их укладку в пазы из-за чрезмерной жесткости.

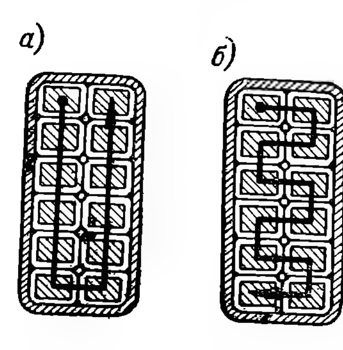


Рис. 60. Два способа чередования проводников при жестких секциях.

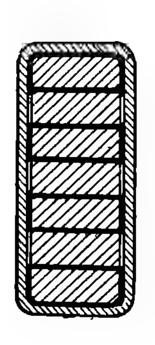


Рис. 61. Изоляция витков жестких секций через один.

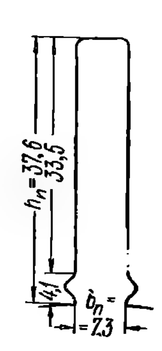


Рис. 62. Эскиз паза к примеру 10.

Так как проводники жестких секций располагаются всегда в строгом порядке, то размеры их поперечного сечения могут быть определены исходя из заданных размеров паза и принятой конструкции изоляции с учетом необходимых зазоров на укладку.

Пример 10. Открытый паз статора имеет размеры, указанные на рис. 62. Жесткие секции двухслойной обмотки должны состоять из 4 витков каждая; номинальное напряжение машины 380 *в*. Требуется определить размеры сечения проводника марки ПБД.

Если принять изоляцию по табл. 2 приложения VI, то, после вычитания из размеров паза суммарных толщин изоляции паза и секции и зазоров на укладку, на долю проводников с их изоляцией остается:

по ширине: 7,3—1,94 = 5,36 *мм*;
по высоте: 33,5—4,22 = 29,28 *мм*.

Число витков в секции мало и по ширине нужно класть один проводник; таким образом, по высоте паза расположатся 8 проводников, и на долю каждого придется

$$\frac{29,28}{8} = 3,66 \text{ мм.}$$

Согласно приложению IV, *Б* при размерах меньшей стороны сечения от 2,1 до 3,8 *мм* двухсторонняя толщина изоляции марки ПБД составляет 0,33 *мм*.

Таким образом, размеры меди проводника получаются:

по высоте: 3,66—0,33 = 3,33 *мм*;
по ширине: 5,36—0,33 = 5,03 *мм*.

В таблице номинальных размеров меди приложения IV, *B* таких размеров нет; имеются ближайшие меньшие размеры:

по высоте: $a = 3{,}28$ *мм*;
по ширине: $b = 4{,}70$ *мм*.

Размер по высоте a хорошо подходит к данному случаю; но размер по ширине b на 0,33 *мм* меньше желаемого. Следующий больший размер $b = 5{,}10$ *мм*, т. е. на 0,07 *мм* превышает сосчитанную величину; так как превышение это невелико, желательно изыскать способ, при помощи которого можно было бы его применить.

Из таких способов можно рассмотреть два:

а) пойти на риск уменьшения зазора на укладку по ширине с 0,3 до 0,23 *мм*;

б) применить более тонкую изоляцию секции или паза.

Если последовать первому из них, нужно будет произвести пробную укладку нескольких секций и при удовлетворительном результате принять ее к исполнению; в случае же неудовлетворительного результата — при чрезмерно тугой укладке — остается второй способ.

Чтобы утоньшение изоляции не шло в ущерб ее качеству, следует заменяющий материал взять хотя и меньшей толщины, но более высокосортный. Так, например, вместо обыкновенного электрокартона толщиной в 0,2 *мм* для изоляции паза можно применить электрокартон повышенного качества толщиной 0,15 *мм* или вместо тафтяной ленты толщиной 0,18 *мм* применить миткалевую ленту толщиной 0,15 *мм*. В первом случае выигрыш по ширине составляет 0,1 *мм*, во втором — 0,12 *мм*.

Остаток места в пазу по высоте может быть заполнен прокладкой под клин по месту.

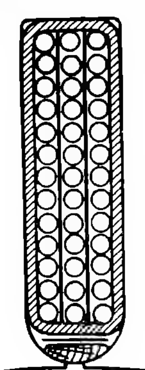


Рис. 63. Расклиновка разрезных секций.

При закрытых или полузакрытых пазах прямоугольной формы, когда приходится прибегать к катушечной обмотке и выполнять ее по способу прошивания или в виде разрезных секций, проводники также укладываются в правильном порядке.

Изоляция разрезных секций принципиально не отличается от гильзовой изоляции жестких секций.

Для того чтобы эти секции прочно сидели в пазах, можно рекомендовать расклинивание их деревянными или фибровыми клиньями, похожими на те, которые применяются в мелких машинах при всыпных обмотках, но лишь соответственно бо́льших размеров (рис. 63); для них следует оставлять по высоте паза необходимый зазор.

Что касается обмотки, выполняемой по способу прошивания, то при ней конструкция изоляции паза чрезвычайно проста; применяемый проводник нормально имеет марку ПБД или ПБОО (один слой пряжи и хлопчатобумажная оплетка); для того чтобы изоляция проводника по возможности меньше лохматилась в процессе протягивания через пазы, следует производить предварительную пропитку проводника в разведенном пропиточном лаке и натирание проводника парафином при протяжке.

Изоляцией проводников от корпуса здесь служит замкнутая гильза, при высоком напряжении машины изготовляемая из мика-

нита на специальном шаблоне, а при низком — свoрачиваемая из листа тонкого электротехнического картона так, чтобы ее толщина была порядка 1,0—1,5 *мм*; можно также изготовлять ее из лакированной бумаги посредством обутюживания на шаблоне примерно до такой же толщины. Гильзы вдвигаются в паз сбоку, поэтому их наружные размеры должны быть меньше размеров паза на 0,3—0,4 *мм*, чтобы образовывался необходимый зазор на вдвигание в паз.

При выполнении обмотки прошиванием тоже могут быть применены два способа чередования проводников: по высоте (рис. 64, *а*) и зигзагом (рис. 64, *б*). В первом случае необходимо наличие прокладок между рядами, которые отнимают часть места в пазу; зато при этом способе в лобовых частях не получается перекрещиваний проводников. Во втором способе прокладки между рядами не нужны, потому что напряжение между соседними витками никогда не может быть велико; но в лобовых частях получается много перекрещиваний, которые необходимо изолировать особо.

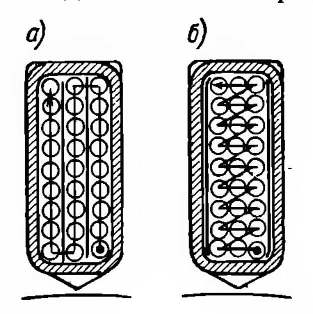


Рис. 64. Два способа чередования проводников при прошивании.

Для того чтобы операция прошивания происходила достаточно свободно, необходимо давать и по ширине и по высоте довольно значительные зазоры, величину которых указать заранее было бы затруднительно; эти зазоры должны быть тем больше, чем крупнее сечение проводника и чем больше проводников содержит паз.

Вынужденное наличие больших пустот в пазу не только понижает использование машины, но и вредно отзывается на теплоотдаче обмотки; поэтому следует всемерно стремиться к уменьшению таких зазоров.

14. Определение средней длины витка при мягких секциях

Каждый виток состоит из двух пазовых частей, длина которых равна полной длине сердечника статора $l_п$ и одинакова для всех витков, и двух лобовых частей, длина которых для отдельных витков различна.

Проводники обмотки любого типа, выйдя из паза, не могут сразу же отгибаться для соединения с проводниками противоположной стороны секции; поэтому лобовая часть, помимо отогнутого участка, всегда состоит еще из двух прямолинейных участков, составляющих продолжение пазовых частей. Чем машина крупнее и чем выше ее напряжение, тем эти участки длиннее. Кроме того, их длина зависит и от условий выполнения обмотки: чем труднее и неудобнее ее вкладывать, тем длиннее приходится делать эти участки. Их длина не зависит ни от полюсного деления, ни от шага

обмотки, но от этих величин непосредственно зависит длина отогнутого участка. Для определения этой зависимости принято вводить понятие о так называемой *средней ширине секции* T, под которой понимается длина дуги окружности с центром на оси машины, заключающаяся между серединами поперечных сечений пазовых частей секции (рис. 65).

Понятно, что для каждого типа обмотки эта зависимость имеет свой вид, определяемый формой секции.

Наиболее просто вычисляется длина лобовой части для двухслойных обмоток с мягкими секциями. Среднюю ширину секции в них можно отсчитывать по дуге окружности, проходящей через середины пазов, с диаметром, равным сумме диаметра расточки D и глубины паза $h_п$.

Если бы обмотка имела диаметральный шаг, то средняя ширина секции была бы равна длине части этой окружности, приходящейся на долю одного полюса:

$$T = \frac{\pi (D + h_п)}{2p} \quad [см].$$

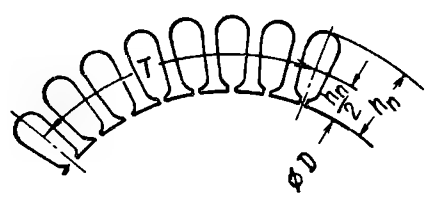


Рис. 65. Определение средней ширины секции.

Но так как шаг обмотки обычно бывает укорочен до величины $y < 3q$, средняя ширина секции оказывается меньшей:

$$T = \frac{\pi (D + h_п)\, y}{2p \cdot 3q} \quad [см].$$

Произведение числа полюсов $2p$ на утроенное число пазов на полюс и фазу $3q$ представляет общее число пазов Z, поэтому окончательно

$$T = \frac{\pi (D + h_п)\, y}{Z} \quad [см]. \qquad (28)$$

Опытом постройки весьма большого количества двигателей установлено, что длина лобовой части может быть после этого выражена равенством

$$l_л = KT + L \quad [см]. \qquad (29)$$

Входящие в нее величины K и L берутся из табл. 2.

Таблица 2

$2p$	Сердечник обматывается до запрессовки в корпус		Сердечник обматывается после запрессовки в корпус	
	K	L [см]	K	L [см]
2	1,25	2,0	1,30	3,0
4	1,30	2,0	1,35	3,0
6	1,40	2,0	1,45	3,0
8	1,50	2,0	1,55	3,0

Подобным же способом может быть определена длина лобовой части и для цепной обмотки с мягкими секциями, с той лишь разницей, что величины K и L берутся на 10—15% выше, чем для двухслойной обмотки.

Что касается катушечных обмоток как с мягкими, так и с жесткими секциями (разрезные секции, прошивная обмотка), то для них крайне затруднительно дать достаточно точные формулы вследствие возможных отступлений в форме секций и их размерах; надежнее всего определять длину лобовых частей по эскизу обмотки. Для предварительных же подсчетов можно принять:

$$l_л \approx 1{,}4\tau + \sigma\,[см], \tag{30}$$

где τ — полюсное деление в *см*, а величина σ в зависимости от размеров машины и ее напряжения колеблется от 2 до 10 *см*.

Средняя длина витка после всего этого определяется по формуле

$$l_в = 2(l_п + l_л)\ [см]. \tag{31}$$

Пример 11. Требуется определить среднюю длину витка для обмотки статора четырехполюсного двигателя, имеющего диаметр расточки $D = 16{,}0$ *см*, полную длину $l_п = 15{,}0$ *см* и глубину паза $h_п = 2{,}3$ *см* при общем числе пазов $Z = 36$.

Для сравнения проведем решение для различных типов обмотки.

а) Двухслойная обмотка

Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{Z}{3 \cdot 2p} = \frac{36}{3 \cdot 4} = 3;$$

наилучший шаг обмотки

$$y \approx 2{,}4q = 2{,}4 \cdot 3 = 7{,}2 \approx 7.$$

Согласно формуле (28), средняя ширина секции равна:

$$T = \frac{\pi\,(D + h_п)\,y}{Z} = \frac{3{,}14\,(16 + 2{,}3) \cdot 7}{36} = 11{,}1\ см.$$

Так как машина ремонтируемая, то величины K и L в формуле (29) следует брать из графы для сердечника, обматываемого после запрессовки в корпус; поэтому

$$K = 1{,}35; \qquad L = 3\ см.$$

Тогда длина лобовой части будет:

$$l_л = KT + L = 1{,}35 \cdot 11{,}1 + 3 = 18\ см.$$

Средняя длина витка после этого получается равной:

$$l_в = 2(l_п + l_л) = 2(15 + 18) = 66\ см.$$

б) Цепная обмотка

Шаг обмотки может быть выбран как диаметральный $y = 9$, так и укороченный, например $y = 7$, как в двухслойной обмотке.

Здесь можно принять:

$$K = 1{,}1 \cdot 1{,}35 = 1{,}50,$$
$$L = 1{,}1 \cdot 3 = 3{,}3 \text{ см}.$$

Тогда при шаге $y = 9$ средняя ширина секции

$$T = \frac{3{,}14\ (16 + 2{,}3) \cdot 9}{36} = 14{,}4 \text{ см}.$$

и длина лобовой части

$$l_л = 1{,}5 \cdot 14{,}4 + 3{,}3 = 24{,}9 \text{ см},$$

а при шаге $y = 7$

$$l_л = 1{,}5 \cdot 11{,}1 + 3{,}3 = 20 \text{ см}.$$

в) Катушечная обмотка

Полюсное деление здесь

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{3{,}14 \cdot 16}{4} = 12{,}6 \text{ см}.$$

Так как размеры машины невелики, в формуле (30) можно принять величину $\sigma = 4$ *см*, тогда

$$l_л = 1{,}4\tau + \sigma = 1{,}4 \cdot 12{,}6 + 4 = 21{,}7 \text{ см}.$$

Таким образом, наименьшей длиной витка обладает двухслойная обмотка, а наибольшей — цепная при диаметральном шаге, что вполне согласуется с опытом.

15. Определение средней длины витка при жестких секциях

Лобовая часть жесткой секции имеет сложную форму; для вычисления средней длины витка следует разбить ее на участки, определить длину каждого из них в отдельности и просуммировать результаты.

В несколько упрощенном виде таких участков можно различить пять (рис. 66).

1. Два прямолинейных участка с длиной M, служащих продолжениями пазовых частей. В зависимости от глубины паза $h_п$, номинального напряжения обмотки и рода изоляции, величина M [*см*] может быть взята из табл. 3.

Таблица 3

Глубина паза $h_п$ [*см*]	30 — 50		51 — 70		71 — 85		86 — 115	
Род изоляции	гильзовая	непрерывная	гильзовая	непрерывная	гильзовая	непрерывная	гильзовая	непрерывная
До 500 *в*	2,5	—	3,0	—	3,5	—	4,0	—
3000 „	4,5	3,5	5,0	4,0	5,5	4,5	6,0	5,0
6000 „	6,0	4,0	6,5	4,5	7,0	5,0	7,5	5,5

2. Два наклонных участка с длиной N, которые можно предположить прямолинейными (хотя в действительности они изогнуты по линиям двоякой кривизны — винтовым линиям на поверхностях конусов, причем углы при вершинах последних для верхнего и нижнего слоев различны).

При таком предположении длина их может быть определена по формуле

$$2N = K_{1}T \ [см],$$

где T есть средняя ширина секции, вычисляемая по формуле (28):

$$T = \frac{\pi \ (D + h_{п}) \ y}{Z} \ [см].$$

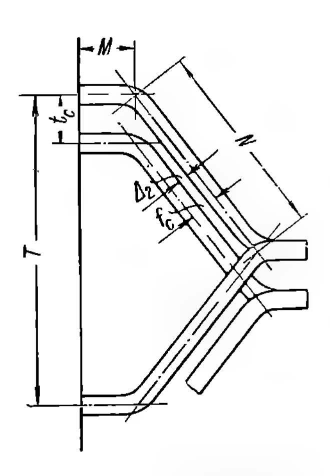


Рис. 66. К определению длины лобовой части жесткой секции.

Что касается коэффициента K_{1}, то его величина зависит

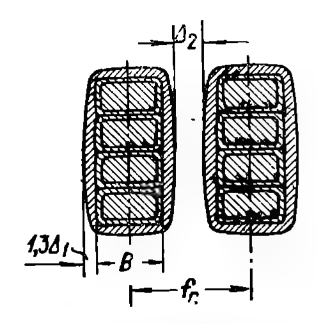


Рис. 67. Определение расстояния между осями секций в отогнутых участках лобовых частей.

от наклона рассматриваемых участков. Этот наклон может быть охарактеризован отношением наименьших расстояний между осями поперечных сечений двух соседних секций в наклонных участках и в прямолинейных участках (см. ниже).

Наименьшее расстояние между осями поперечных сечений в наклонных участках равно сумме действительной ширины поперечного сечения секции и зазора Δ_2, необходимого для прохода охлаждающего воздуха.

Действительная ширина сечения секции в свою очередь составляется из ширины B (рис. 67) всех рядом лежащих проводников с их изоляцией и удвоенной толщины общей изоляции лобовой части. Если обозначить эту толщину в непропитанном состоянии через Δ_1 и учесть, что разбухание от пропитки достигает 30% первоначальной толщины, то искомое наименьшее расстояние будет:

$$f_{c} = B + 2{,}6\ \Delta_{1} + \Delta_{2} \ [мм]. \qquad (32)$$

Ширина B известна из расчета сечения проводника, толщина Δ_1 берется в соответствии с применяемой изоляцией лобовых частей, а зазор Δ_2 может быть взят из табл. 4.

Таблица 4

Номинальное напряжение [в]	До 500	3000	6000
Наименьший зазор Δ_2 [мм]	4,5	4,5—5,5	5,0—6,5

За наименьшее расстояние между осями поперечных сечений прямолинейных участков можно принять сумму ширины паза $b_п$ и наименьшей ширины зубца $b'_з$

$$t_с = b_п + b'_з \,[мм]. \quad (33)$$

По отношению расстояний $f_с : t_с$ из табл. 5 отыскивается соответствующее значение коэффициента K_1.

Таблица 5

$f_с : t_с =$	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
$K_1 =$	1,12	1,15	1,20	1,26	1,33	1,41	1,51	1,67

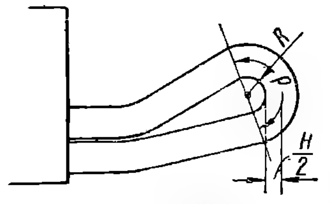


Рис. 68. Определение длины головки жесткой секции.

3. Головка секций — переход от нижнего слоя к верхнему. Хотя этот участок в действительности близок по форме к полувитку винтовой спирали, но без особой погрешности можно принять длину его среднего волокна P за длину полуокружности, радиус которой равен радиусу закругления R самого внутреннего проводника (рис. 68), сложенному с половиной суммы высот сечений всех проводников секции, лежащих друг над другом, с их изоляцией:

$$P = \pi\left(R + \frac{H}{2}\right)[см].$$

Величина радиуса закругления R [см] может быть взята из табл. 6.

Таблица 6

Напряжение [в]	Изоляция	
	гильзовая	непрерывная
До 500	1,2	—
„ 3000	1,2	1,5
„ 6000	1,5	1,5

Таким образом, длина среднего волокна лобовой части жесткой секции равна:

$$l_л = 2M + 2N + P = 2M + K_1T + \pi\left(R + \frac{H}{2}\right)[см]. \qquad (34)$$

Пример 12. Определить среднюю длину витка обмотки статора шестиполюсной машины с общим числом пазов $Z = 72$ и шагом $y = 10$, если диаметр расточки $D = 39$ *см*, полная длина сердечника $l_п = 30$ *см*, размеры паза и обмотка соответствуют данным примера 10, а номинальное напряжение равно 220/380 *в*.

Согласно приведенным выше таблицам, длина одного прямолинейного участка лобовой части $M = 2{,}5$ *см*, наименьший зазор между наклонными участками лобовых частей соседних секций $\Delta_2 = 4{,}5$ *мм* и радиус закругления $R = 1{,}2$ *см*.

Если изоляция лобовых частей выполнена согласно табл. 2 приложения VI, то ее двухсторонняя толщина с учетом разбухания от пропитки должна быть:

$$2{,}6\ \Delta_1 = 1{,}86\ мм.$$

Широкая сторона выбранного сечения с изоляцией имеет размер

$$b' = 5{,}43\ мм.$$

Так как по ширине паза лежит один проводник, то

$$B = b' = 5{,}43\ мм.$$

Таким образом, наименьшее расстояние между осями поперечных сечений наклонных участков равно:

$$f_c = B + 2{,}6\,\Delta_1 + \Delta_2 = 5{,}43 + 1{,}86 + 4{,}5 = 11{,}79\ мм.$$

Наименьшее расстояние между осями поперечных сечений прямолинейных участков

$$t_c = b_п + b'_з = 7{,}3 + 9{,}7 = 17{,}0\ мм.$$

По отношению

$$\frac{f_c}{t_c} = \frac{11{,}79}{17{,}0} \approx 0{,}69$$

из табл. 5 можно принять значение

$$K_1 = 1{,}40.$$

Средняя ширина секции

$$T = \frac{\pi(D + h_п)\,y}{Z} = \frac{3{,}14\ (39 + 3{,}76)\ 10}{72} = 18{,}7\ см.$$

Высота сечения выбранного проводника с изоляцией равна:

$$a' = 3{,}61\ мм.$$

Так как в секции 4 витка, то сумма высот проводников равна:

$$H = 4 \cdot 3{,}61 = 14{,}4\ мм = 1{,}44\ см.$$

Теперь можно определить длину лобовой части

$$l_л = 2M + K_1T + \pi\left(R + \frac{H}{2}\right) =$$

$$= 2 \cdot 2{,}5 + 1{,}4 \cdot 18{,}7 + 3{,}14\left(1{,}2 + \frac{1{,}44}{2}\right) = 37{,}22\ см.$$

Таким образом, средняя длина витка

$$l_в = 2(l_п + l_л) = 2(30 + 37{,}22) = 134{,}4\ см.$$

При расчете обмоток с жесткими секциями очень важно уметь определять вылет лобовых частей, так как если он окажется слишком велик, то машину нельзя будет закрыть щитами.

Для определения вылета можно воспользоваться тем же подразделением лобовых частей на участки, которое было применено для определения их длин (рис. 69).

1. Прямолинейный участок, служащий продолжением пазовой части и имеющий длину M.

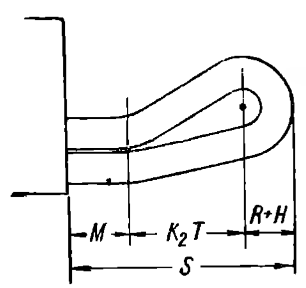


Рис. 69. Определение вылета жесткой секции статора.

2. Наклонный участок, составляющий главную часть вылета S. Эта часть зависит от средней ширины секции T и от наклона данного участка, который определяется отношением $f_c : t_c$

$$Q = K_2 T \ [см],$$

где K_2 есть коэффициент, учитывающий наклон; значения его в зависимости от отношения $f_c \ t_c$ могут быть взяты из табл. 7.

Таблица 7

$f_c : t_c =$	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
$K_2 =$	0,25	(,29	0,33	0,38	0,43	0,49	0,57	0,67

3. Головка секции, длина которой в направлении оси машины равна радиусу закругления R, сложенному с суммой высот проводников с их изоляцией H.

Таким образом, вылет равен:

$$S = M + Q + R + H = M + K_2 T + R + H \ [см]. \quad (35)$$

Пример 13. Определить вылет обмотки из предыдущего примера.

По табл. 7 для отношения $f_c \ t_c = 0{,}69$ может быть взято значение

$$K_2 = 0{,}48;$$

отсюда вылет

$$S = M + K_2 T + R + H = 2{,}5 + 0{,}48 \cdot 18{,}7 + 1{,}2 + 1{,}44 = 14{,}1 \ см.$$

Длина лобовой части стержневой волновой обмотки ротора может быть определена по формуле, подобной (34), со следующими изменениями:

1) наименьшее расстояние между осями поперечных сечений в наклонных участках лобовых частей f_p должно быть взято по формуле

$$f_p = b + 2 \Delta_1 + 0{,}7 \ [мм], \quad (36)$$

где b — ширина поперечного сечения стержня в *мм;*

$2\Delta_1$ — двухсторонняя толщина изоляции лобовой части в *мм;*

2) наименьшее расстояние между осями поперечных сечений прямолинейных участков $t_р$ может быть принято равным сумме ширины паза ротора $b_п$ и ширины зубца у его корня $b_з''$ (рис. 70):

$$t_р = b_п + b_з'' \ [мм]; \tag{37}$$

3.) средняя ширина секции должна быть взята по окружности с диаметром (рис. 71)

$$D - 2\delta - h_п \ [см],$$

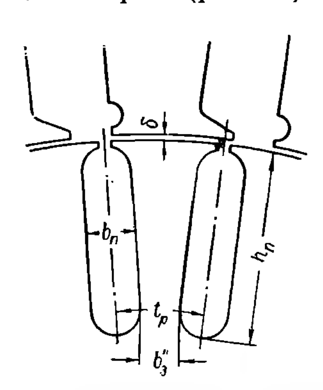


Рис. 70. Наименьшее расстояние между осями соседних секций ротора при выходе из паза.

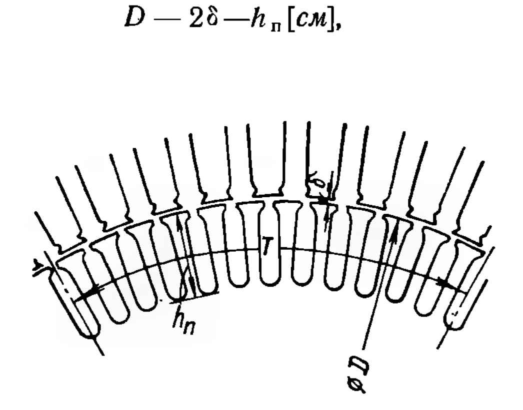


Рис. 71. Определение средней ширины секции фазового ротора.

где δ есть величина зазора между статором и ротором; так как обмотка ротора нормально имеет диаметральный шаг, то средняя ширина секции является длиной части этой окружности, приходящейся на долю одного полюса:

$$T = \frac{\pi (D - 2\delta - h_п)}{2p} \ [см]; \tag{38}$$

4) обмотка ротора обычно не имеет головок, гнутых по радиусу *R;* вместо того верхний и нижний слой обмотки соединяются друг с другом посредством пропаянных хомутиков. С практически достаточной точностью можно принять, что сумма длин всех участков лобовой части, параллельных оси машины, равна учетверенной глубине паза.

Учитывая все сказанное, можно определить длину лобовой части обмотки ротора по формуле:

$$l_л = K_1 T + 4h_п \ [см], \tag{39}$$

и ее вылет по формуле:

$$S = K_2 T + 2h_п \ [см]. \tag{40}$$

Значения коэффициентов K_1 и K_2 берутся по табл. 5 и 7.

16. Определение веса и сопротивления обмотки

Одновременно с определением размеров обмотки необходимо подсчитать потребное для ее изготовления количество проводника по весу.

Если параллельно включено a' проводников, сечение одного проводника q выражено в квадратных миллиметрах, а средняя длина витка $l_в$ — в сантиметрах, то для того, чтобы произведение этих двух величин представляло объем одного витка в кубических сантиметрах, необходимо его разделить на 100 для перевода сечения из квадратных миллиметров в квадратные сантиметры; а чтобы получить вес витка в килограммах, нужно еще умножить это произведение на удельный вес меди, принимаемый равным 8,9, и разделить на 1000.

При последовательном соединении витков в каждой фазе полное количество витков в обмотке равно $3w$, а если обмотка имеет в каждой фазе a параллельных ветвей, то $3wa$.

Таким образом, полный вес меди в обмотке составляет:

$$G=\frac{8{,}9\cdot waa'ql_в}{100\cdot 1000}=26{,}7\ waa'\ ql_в\cdot 10^{-5}\ [кг]. \qquad (41)$$

Подсчитанный таким путем вес носит название **веса меди без надбавки**. В этот вес не входят концы проводника, которые служат для соединения секций между собой, неизбежные при изготовлении обрезки и т. д.

Необходимая надбавка определяется по усмотрению производства и обычно колеблется от 5 до 10%.

Если обмотка выполняется из изолированного проводника, как это имеет место в большинстве случаев при обматывании асинхронных двигателей малой и средней мощности (кроме волновых обмоток ротора, которые большей частью изготовляются из голого проводника, изолируемого при изготовлении полусекций), то подсчитанный вес чистой меди еще непригоден для отпуска проводника по весу; необходимо его увеличить на величину веса его изоляции.

При медном проводнике прямоугольного сечения наиболее употребительной марки ПБД для получения веса изолированной меди с вполне достаточной для практических целей точностью следует увеличить подсчитанный вес голой меди на 4%:

$$G'=1{,}04G\ [кг]. \qquad (42)$$

В случае применения меди круглого сечения, имеющей диаметр без изоляции d и с изоляцией d', вес меди с изоляцией вне зависимости от марки может быть определен по опытной формуле

$$G'=\left[\ 0{,}876+0{,}124\ \left(\frac{d^1}{d}\right)^2\ \right]\ G\ [кг]. \qquad (43)$$

Пример 14. Обмотка статора имеет в каждой фазе $w=32$ витка со средней длиной $l_в=134{,}4$ *см;* число параллельных ветвей $a=3$; проводники прямоугольного сечения размером $3{,}28\times 5{,}1$ *мм,* не подразделенного на части,

т. е. $a' = 1$. Требуется определить вес обмотки с изоляцией марки ПБД (без надбавки).

По таблице приложения IV сечение меди указанного профиля $q = 16{,}2$ *мм*².

Чистый вес меди без изоляции и без надбавки составляет согласно формуле (41):

$$G = 26{,}7\ waa'ql_{\text{в}} \cdot 10^{-5} = 26{,}7 \cdot 32 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 16{,}2 \cdot 134{,}4 \cdot 10^{-5} = 55{,}7\ \textit{кг},$$

а искомый вес ее с изоляцией (также без надбавки) по формуле (42):

$$G' = 1{,}04G = 1{,}04 \cdot 55{,}7 = \mathbf{58{,}0}\ \textit{кг}.$$

Данные обмотки не будут полными, если в них отсутствует величина сопротивления каждой ее фазы.

Как известно, сопротивление r всякого металлического проводника, имеющего постоянное сечение, прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади поперечного сечения q; коэффициентом пропорциональности служит так называемое удельное сопротивление материала проводника ρ, которое равно сопротивлению проводника из этого материала, имеющего длину 1 *м* и поперечное сечение 1 *мм*², при определенной температуре, за которую в электромашиностроении принимается $+15°$ С:

$$r = \frac{\rho l}{q}\ [\textit{ом}].$$

Для того чтобы результат получился в омах, необходимо выразить длину l в метрах, а площадь поперечного сечения q — в квадратных миллиметрах.

Для меди, применяемой при изготовлении проводников, удельное сопротивление принимается равным

$$\rho = \frac{1}{57} = 0{,}0175\ [\textit{ом} \cdot \textit{мм}^2/\textit{м}].$$

Чтобы получить длину проводника одной фазы обмотки в метрах, нужно умножить число витков в ней w на среднюю длину витка $l_{\text{в}}$ [*см*] и разделить произведение на 100, а за сечение принять площадь поперечного сечения одного проводника q [*мм*²], умноженную на число параллельных ветвей a и на число параллельных сечений a'; тогда сопротивление одной фазы при 15° С будет:

$$r = \frac{w\, l_{\text{в}}}{5700\, aa'q}\ [\textit{ом}]. \qquad (44)$$

Пример 15. Требуется вычислить сопротивление обмотки из предыдущего примера при температуре 15° С.

Согласно формуле (44), искомое сопротивление при 15° С равно:

$$r = \frac{w\, l_{\text{в}}}{5700\, aa'q} = \frac{32 \cdot 134{,}4}{5700 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 16{,}2} = \mathbf{0{,}0155}\ \textit{ом}.$$

Пример 16. Вычислить сопротивление обмотки из примера 11, если число витков $w = 132$ и диаметр проводника $d = 1{,}45$ *мм* при двух параллельных сечениях, т. е. при $a' = 2$.

По таблице приложения III один километр этого проводника имеет сопротивление 10,4 *ом*; при двух параллельно соединенных сечениях сопротивление одного километра будет вдвое меньше, т. е. 5,2 *ом*, а одного метра — 0,0052 *ом*.

Отсюда сопротивление каждой фазы обмотки может быть найдено как произведение числа витков на среднюю длину витка в метрах и на сопротивление одного метра.

Например, для варианта с цепной обмоткой при шаге $y = 9$ длина лобовой части

$$l_л = 24{,}9 \ см$$

и средняя длина витка

$$l_в = 2(l_п + l_л) = 2(15 + 24{,}9) = 79{,}8 \ см = 0{,}798 \ м$$

Отсюда искомое сопротивление

$$r = 132 \cdot 0{,}798 \cdot 0{,}0052 = \mathbf{0{,}548} \ ом.$$

17. Приближенное определение полезной мощности

Полезная мощность, которую способен развивать двигатель, зависит от очень многих обстоятельств, но главным образом от нагревания его изолированных обмоток во время работы. Именно, за номинальную продолжительную (или кратковременную) мощность двигателя можно считать такую, при которой превышение температуры обмоток статора, а также и ротора, если он фазовый, над температурой окружающей среды не превосходит установленных пределов; подразумевается при этом, что приложенное к двигателю напряжение и частота имеют номинальные значения, и температура окружающей среды не превосходит некоторую нормальную величину (обычно +35°C).

Когда двигатель построен, то определение его номинальной мощности не представляет принципиальных затруднений; испытание под нагрузкой с достаточно тщательным измерением температуры обмоток исчерпывающе решает поставленную задачу. Но пока двигатель еще не существует, пока только производится его расчет, установление номинальной мощности встречает большие трудности, потому что точное предопределение превышения температуры обмоток во время работы чисто расчетным путем не представляется возможным, в особенности когда это касается относительно небольших машин.

Поэтому остается только прибегнуть к сравнению рассчитываемой машины с данными того огромного опыта, который накоплен практикой постройки большого количества асинхронных двигателей.

Простейшим способом такого сравнения (хотя и очень приближенным) является суждение о номинальной мощности машины на основании выбора допустимой плотности тока в обмотке статора.

Под плотностью тока $s_а$ в обмотке понимается частное от деления номинального тока обмотки I на площадь поперечного сечения ее проводника q, а при наличии параллельных ветвей и

параллельных проводников—на произведение площади поперечного сечения одного проводника на число параллельных ветвей a и на число параллельных проводников a':

$$s_a = \frac{I}{aa'q} \ [a/мм^2].$$

Как показывает опыт, та величина плотности тока, при которой превышение температуры обмотки достигает установленных пределов, мало зависит от размеров машины, но зато очень сильно — от ряда других обстоятельств:

а) от исполнения машины — она выше у открытых и защищенных машин и ниже у закрытых и герметических;

б) от системы и интенсивности вентиляции — она тем выше, чем больше поток воздуха, охлаждающего машину изнутри или с наружной поверхности, и чем правильнее он распределяется по охлаждаемым поверхностям;

в) от рода и количества примененной изоляции — она тем выше, чем тоньше и теплопроводнее изоляция как пазовых, так и лобовых частей обмотки; поэтому стремление к применению высоких сортов изоляционных материалов, позволяющих уменьшить их толщину и увеличить теплопроводность, оправдывается не только выигрышем места в пазу для увеличения сечения проводников, но и возможностью повышения допустимой плотности тока; и то, и другое ведет к увеличению номинальной мощности.

Особенно вредное влияние на теплопроводность изоляции оказывает наличие в ней воздушных прослоек, так как теплопроводность воздуха очень низка; поэтому чем лучше пропитаны обмотки, тем выше может быть допустимая плотность тока.

В приложении VII в виде графика даны значения плотности тока в обмотке статора, которые могут быть рекомендованы для применения в асинхронных двигателях при различных исполнениях и способах вентиляции в предположении, что изоляция обмотки статора соответствует данным таблиц приложения VI и что она достаточно хорошо пропитана.

Однако, опираясь только на одну плотность тока в обмотке статора s_a, можно легко впасть в ошибку, в особенности в случае машин очень старого изготовления.

Если сравнить между собой два паза одинаковой формы, но различной величины, заполненные проводниками с одним и тем же коэффициентом заполнения $f_п$ и нагруженными с одинаковой плотностью тока s_a, то при прочих равных условиях (вентиляция и т. д.) содержимое большего паза будет нагреваться сильнее, потому что в нем более затруднен отвод тепла от проводников.

Действительно, при возрастании размеров паза поверхность его стенок, через которые уходит тепло, выделяемое током в проводниках, возрастает пропорционально **первой** степени размеров; в то же время площадь паза, а вместе с ней и количество выделяемого тепла, возрастает пропорционально **второй** степени

размеров. Таким образом, возрастание поверхности охлаждения отстает от возрастания количества выделяемого тепла, и отвод последнего затрудняется, что и ведет к повышению температуры внутри паза.

С другой стороны, если сравнить между собой пазы одинаковых размеров, то чем теснее они расположены, тем выше при прочих равных условиях будет нагревание их содержимого, так как тем больше количество тепла, выделяемого в одном и том же объеме статора, имеющего одну и ту же общую поверхность охлаждения.

По этим причинам целесообразно ввести еще одну характерную величину, позволяющую контролировать правильность выбора плотности тока, конечно также на основе сравнения с данными опыта постройки большого количества машин.

Эта величина носит название **линейной нагрузки** и обозначается символом A. Она представляет произведение тока в проводнике на число проводников, приходящееся на долю 1 *см* длины окружности расточки статора.

Если последняя имеет диаметр D и общее число пазов Z, а в каждом из них число проводников $s_п$, то при токе в проводнике, равном фазному точку I, разделенному на число параллельных ветвей, линейная нагрузка согласно ее определению будет равна:

$$A = \frac{Zs_п I}{\pi D a} \ [a/см].$$

Так как

$$\frac{\pi D}{2p} = \tau \ [см],$$

то выражение для AZ может быть написано в более удобной для применения форме:

$$AS = \frac{Zs_п I}{2p\tau a} \ [a/см]. \qquad (45)$$

Чем машина больше и чем выше ее скорость вращения, тем более высокие значения может принимать линейная нагрузка; подобно плотности тока, она тем выше, чем лучше условия вентиляции машины и чем ниже ее номинальное напряжение.

В приложении VII приведены, помимо плотностей тока, также и линейные нагрузки для машин различного исполнения.

Нельзя не указать на относительность графиков приложения VII; уже сделанные оговорки в отношении изоляции и ее пропитки говорят о том, что в зависимости от применяемых материалов и технологии допустимые плотности тока могут быть подвержены более или менее значительным колебаниям, вследствие чего к ним нужно относиться весьма критически.

Некоторой неопределенностью отличаются и характеристики вентиляции, указанные на графиках приложения VII. Только одна из них — «закрытые невентилируемые» — понятна без особых по-

яснений; не случайно, что на графике для линейной нагрузки ей соответствует наиболее узкая полоса.

При характеристике «закрытые с обдуваемой поверхностью» на выбор плотности тока и линейной нагрузки будет влиять интенсивность обдува, а также то обстоятельство, применен ли в данной машине внутренний вентилятор, способствующий подводу выделяющегося тепла к обдуваемым поверхностям, или нет.

Наиболее неопределенна характеристика «нормально вентилируемые»; под нее могут подходить и машины в защищенном исполнении с протяжной вентиляцией, и машины в открытом исполнении, зачастую вовсе не имеющие никаких специальных устройств для вентиляции. Здесь надо учитывать, что машина при прочих равных условиях вентилируется тем лучше, чем она быстроходнее.

Характеристика «исключительно сильно вентилируемые» относится главным образом к двухполюсным машинам, в особенности когда они снабжены двумя вентиляторами или имеют продольные вентиляционные каналы.

Во всяком случае, окончательная проверка выбора плотности тока и линейной нагрузки может быть произведена только опытным путем; поэтому необходимо производить как можно больше опытных проверок результатов их применения путем систематического проведения испытаний выпускаемых двигателей на нагревание под нагрузкой. Только таким способом можно внести в данные этого приложения те поправки, которые необходимы для согласования их с состоянием производства и его технологии.

Задавшись выбранной допустимой плотностью тока s_a и зная сечение проводника обмотки статора q, число ее параллельных ветвей a и число параллельных проводников a', можно получить предполагаемый номинальный ток статора:

$$I = aa' q s_a \; [a]. \qquad (46)$$

Известно, что мощность переменного, в частности трехфазного, тока пропорциональна напряжению, току и коэффициенту мощности ($\cos\varphi$); таким образом, для определения величины электрической мощности следует применить выражение:

$$P_1 = \frac{\sqrt{3}\, UI \cos\varphi}{1000} \; [квт].$$

Мощность, получаемая из этого выражения, является электрической мощностью, которую двигатель потребляет от сети, или, как ее называют, *подводимой мощностью*. Часть этой мощности расходуется на покрытие ряда потерь внутри двигателя, а остаток выделяется на его валу в виде *отдаваемой механической мощности* P_2.

Отношение отдаваемой мощности к подводимой носит название *коэффициента полезного действия*; он обычно выра-

жается в процентах, для чего это отношение нужно еще умножить на 100:

$$\eta = 100 \frac{P_2}{P_1} [\%].$$

Таким образом, для полезной мощности двигателя получается выражение:

$$P_2 = \frac{\sqrt{3}\, UI\eta \cos\varphi}{1000 \quad 100} [квт]. \qquad (47)$$

Входящие в правую часть этого выражения коэффициенты (полезного действия и мощности) объединяются обычно под общим названием экономических показателей машины. На тех ступенях расчета, которые были до сих пор рассмотрены, их значения остаются пока неизвестными, и нужно еще много расчетных операций для того, чтобы подойти к их определению расчетным путем. Вдобавок такой расчет в применении к перематываемой машине далеко не всегда оказывается возможным.

Поэтому приходится обратиться еще раз к опытным данным для того, чтобы оценить значение экономических показателей. В приложении VII даны графики таких значений коэффициентов полезного действия и мощности, которые следует считать нормальными для двигателей различных мощностей с различными числами полюсов. Эти значения заимствованы из действующих норм на асинхронные двигатели и являются результатом обширных наблюдений; поэтому они весьма правдоподобны для всякой машины не слишком старого изготовления. Если при выборе показателей и будет совершена некоторая ошибка в значении каждого из них в отдельности, то величина их произведения может считаться достаточно характерной для двигателей данной мощности и с данным числом полюсов; а из предосторожности можно сделать некоторые скидки с этих значений.

Для удобства пользования эти графики построены в зависимости не от полезной мощности P_2, а от кажущейся (вольтамперной) мощности

$$P = \frac{\sqrt{3}\, U I}{1000} [ква]. \qquad (48)$$

Пример 17. Сечение проводника обмотки статора четырехполюсного двигателя $q = 3{,}3$ *мм*²; номинальное линейное напряжение $U = 380$ *в* при сопряжении фаз в звезду. Требуется определить приблизительную мощность двигателя, если исполнение его открытое с нормальной вентиляцией; полюсное деление $\tau = 12{,}6$ *см*, число пазов на статоре $Z = 36$ и в пазу находится $s_п = 22$ проводника; по виду его мощность должна быть в пределах от 5 до 10 *квт*.

Согласно данным приложения VII плотность тока для машин такого рода исполнения и мощности может быть принята $s_а = 4{,}5$ *а/мм*²; следова-

тельно, ток статора может быть допущен до $I = 4{,}5 \cdot 3{,}3 = 14{,}8$ *а*, что дает вполне допустимую здесь линейную нагрузку:

$$A = \frac{Zs_{п}I}{2p\tau a} = \frac{36 \cdot 22 \cdot 14{,}8}{4 \cdot 12{,}6 \cdot 1} = 233 \ a/см$$

и кажущуюся мощность:

$$P = \frac{\sqrt{3}\,UI}{1000} = \frac{\sqrt{3}\ \ 380 \cdot 14{,}8}{1000} = 9{,}75 \ ква.$$

По кривым приложения VIII для четырехполюсных двигателей с этой кажущейся мощностью экономические показатели имеют следующие значения:

$$\eta = 86\% \quad и \quad \cos\varphi = 0{,}86.$$

Из предосторожности принимаем значение коэффициента полезного действия ниже на 3% и коэффициента мощности на 0,02; тогда искомая полезная мощность двигателя будет:

$$P_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 14{,}8 \cdot 0{,}83 \cdot 0{,}84}{1000} = 6{,}8 \ квт.$$

Если на двигателе сохранился старый заводский щиток, то его данные могут быть использованы для проверки мощности, получающейся при перемотке не только в том случае, когда задачей перемотки является восстановление двигателя по старым данным, но и при изменении последних, например при перемотке на другую скорость вращения.

С достаточной степенью точности можно считать, что при изменении скорости вращения мелких и средних двигателей номинальная мощность изменяется пропорционально скорости вращения. Исключение из этого составляет только случай перемотки с большего числа пар полюсов на одну пару; в частности, мощность четырехполюсного двигателя при перемотке на двухполюсный возрастает не вдвое, как следовало бы ожидать, а в лучшем случае лишь в 1,3—1,5 раза вследствие крайне нерационального распределения индукций в отдельных частях магнитной цепи.

Однако даже в том случае, когда двигатель восстанавливается по старым данным, не всегда можно надеяться на полное восстановление его прежней номинальной мощности, в особенности когда остатки обмоток не сохранились, или когда имеется сомнение в том, что сохранившаяся обмотка действительно относится к его первоначальному изготовлению, а не представляет неудачную кустарную перемотку, при которой первоначальные данные могли быть более или менее грубо нарушены. Дело в том, что современные высокоиспользованные двигатели, в особенности относительно небольших мощностей, являются продуктом кропотливой расчетной и исследовательской работы, в результате которой магнитные и электрические нагрузки их отдельных частей доведены до очень высокой степени, а технология их изготовления, в частности выполнения изоляции и ее пропитки, стоит на уровне, трудно достижимом в условиях ремонтных мастерских.

Поэтому иногда расчет создает впечатление, что мощность, указанная на заводском щитке, не может быть достигнута. В самом деле, при беглом и поверхностном расчете трудно сразу напасть на ту главную идею, которая бывает положена в основу расчета серий высокоиспользованных машин.

Мало того, даже машины, перемотанные, казалось бы, вполне по старым данным обмотки с точным соблюдением чисел витков и сечений проводников, не всегда оказываются способными полностью развить прежнюю мощность, что иногда и обнаруживается при испытании таких машин на нагревание; причину этого следует искать в несоответствии примененной изоляции и, в особенности, в несовершенстве пропитки (если только не были допущены грубые ошибки конструктивного характера — например применен несоответствующий вентилятор или заглушены каналы и отверстия для прохода охлаждающего воздуха).

18. Двигатели с переключением числа полюсов

При неизменной частоте питающего тока скорость вращения асинхронного двигателя определяется числом полюсов обмотки статора (и ротора, если он фазовый) и лишь в очень малой степени зависит от нагрузки, поскольку скольжение при нормальных условиях работы невелико.

Между тем по роду работы от двигателя нередко требуется возможность изменения скорости вращения, причем зачастую можно вполне удовлетвориться ступенчатым (скачкообразным) ее изменением.

Такое изменение скорости вращения может быть осуществлено путем устройства специальной обмотки статора (а в случае двигателя с фазовым ротором — также и обмотки ротора), допускающей изменение числа полюсов посредством переключений ее отдельных частей; двигатели с такими обмотками носят название *многоскоростных*.

Существуют обмотки, допускающие переключение на три и даже на четыре различных числа полюсов; однако практически наибольшее распространение имеют обмотки с переключением только на два числа полюсов, обычно находящихся в отношении 1 : 2. Такие обмотки называются *двухскоростными*.

Чем больше различных чисел полюсов имеет обмотка, тем большее число выводов она должна иметь для осуществления необходимых переключений и тем сложнее переключающее устройство.

Ниже рассматриваются только двухскоростные обмотки с наименьшим числом выводов, равным 6, получившие широкое распространение.

Принцип устройства таких обмоток состоит в том, что каждая их фаза подразделяется на две половины, в одной из которых направление обхода от начала к концу фазы при обоих числах полюсов сохраняется неизменным, а в другой — при переходе от одного числа полюсов к другому изменяется на обратное.

Для пояснения этого на рис. 72, *а* представлена одна фаза катушечной четырехполюсной обмотки с тремя пазами на полюс и фазу и с расположением лобовых частей в двух ярусах. Из рисунка видно, что направления обходов обеих групп секций от начала к концу фазы одинаковы — в данном случае по часовой стрелке.

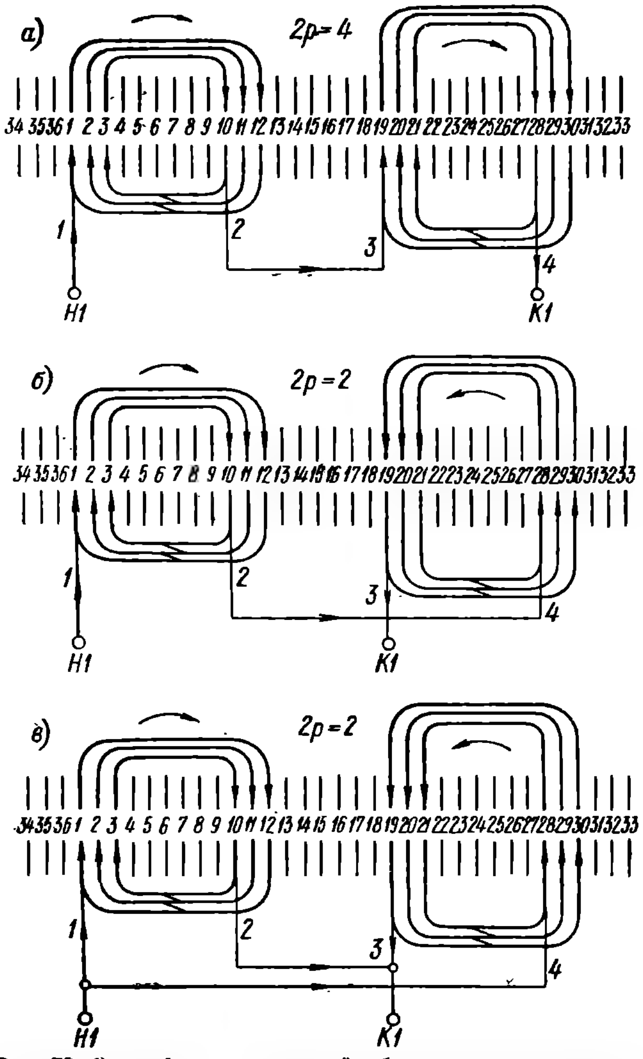


Рис. 72. Одна фаза катушечной обмотки с переключением числа полюсов: *а* — при последовательном соединении на 4 полюса; *б* — при последовательном соединении на 2 полюса; *в* — при параллельном соединеннн на 2 полюса.

На рис. 72, *б* представлена эта же обмотка, переключенная

с четырех полюсов на два; для этого в секциях группы *1—2* направления токов оставлены прежними, а в секциях группы *3—4* изменены на обратные, так что направления обходов этих секций стали против часовой стрелки. Число пазов на полюс и фазу стало вдвое бо́льшим — 6 вместо 3, но пазы, занятые проводниками одной и той же фазы с одинаковыми направлениями обхода, лежат не все рядом, а разделены промежутком в 6 пазов. Это обстоятельство не является препятствием к работе обмотки, но понижает ее электромагнитные качества при меньшем числе полюсов, так как дает более низкое значение обмоточного коэффициента.

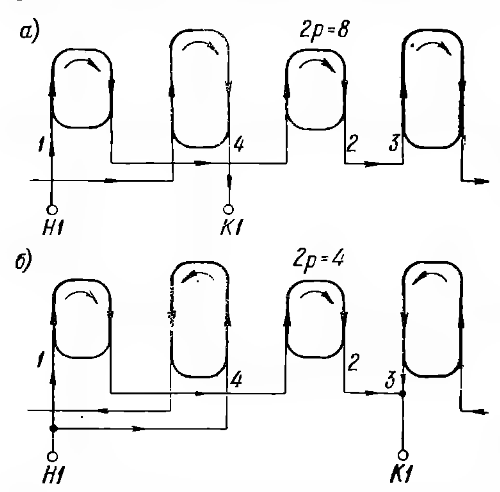


Рис. 73. Принципиальная схема переключения двухскоростной обмотки при большем числе полюсов, не меньшем 8: *а* — большее число полюсов; *б* — меньшее число полюсов.

Для того чтобы осуществить переключение со схемы рис. 72, *а* на схему рис. 72, *б*, следовало бы иметь от данной фазы по крайней мере три вывода—например от точек *2*, *3* и *4*; таким образом, всего в машине получается девять выводов, что противоречит поставленному условию.

Но изменение направления обхода группы секций *3—4* может быть осуществлено и другим путем — если соединить между собой точки *1* и *4* и перенести конец фазы *К1* из точки *4* в соединительную перемычку между точками *2* и *3*, как показано на рис. 72, *в*.

Если большее число пар полюсов, а вместе с тем и групп секций каждой фазы, больше двух (например 4, 6 и т. д.), то группы с неизменным направлением обхода должны чередоваться с группами, в которых оно изменяется на обратное, как показано на рис. 73, *а* и *б*. Группы секций каждой половины фазы могут быть соединены между собой не только последовательно, как на рис. 73, но и параллельно, хотя при катушечной обмотке это может вызвать некоторую неравномерность распределения токов между параллельными ветвями. Таким образом, всякая катушечная обмотка с четным числом пар полюсов может быть легко переключена на число полюсов в два раза меньшее, если только соединения групп ее секций выполнены в соответствии с рис. 73.

Совершенно иначе обстоит дело в двухслойных обмотках. На рис. 74 представлена одна фаза четырехполюсной двухслойной обмотки с диаметральным шагом; число групп секций в ней равно числу полюсов, т. е. четырем, причем они обходятся от начала фа-

зы к ее концу поочередно в противоположных направлениях. Поэтому не представляется возможным разделить фазу на две половины так, чтобы изменение направления обхода в одной из них дало изменение числа полюсов, и приходится прибегать к другому устройству обмотки, показанному на рис. 75, *а*. Эта обмотка также имеет диаметральный шаг, как и обмотка рис. 74, но число групп секций в ней равно большему числу пар полюсов, как и в катушечной обмотке рис. 72, *а*, и она, подобно последней, может быть без затруднения переключена на половинное число пар полюсов (рис. 75, *б*).

На рис. 76 дана схема переключения для двухскоростных обмоток, имеющих шесть выводов; при большем числе полюсов фазы

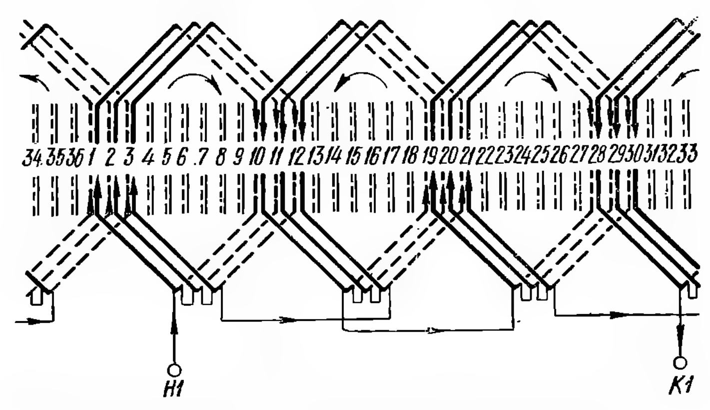


Рис. 74. Одна фаза двухслойной четырехполюсной обмотки с диаметральным шагом.

сопряжены наглухо в звезду, и изменение числа полюсов достигается переносом питания из концов фаз (точки *4*, *8* и *12*) в их середины (точки *2—3*, *6—7* и *10—11*) с одновременным замыканием освободившихся концов друг с другом, благодаря чему образуется вторая нулевая точка, и при меньшем числе полюсов обмотка оказывается сопряженной в звезду с двумя параллельными ветвями.

На рис. 77 представлена другая схема для обмоток с шестью выводами; в ней фазы сопряжены при большем числе полюсов в треугольник, а изменение числа полюсов осуществляется переносом питания из вершин треугольника (точки *1—12*, *4—5* и *8—9*) в середины его сторон (точки *2—3*, *6—7* и *10—11*) с одновременным замыканием освободившихся вершин друг с другом в общую нулевую точку; и в этом случае при меньшем числе полюсов обмотка оказывается сопряженной в звезду с двумя параллельными ветвями.

В обоих случаях следует иметь в виду, что при сохранении порядка чередования фаз питания направление вращения при изменении числа полюсов изменяется на обратное. Если требуется, чтобы

а)
2p=4

34 35 36 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33

1 2 3 4

Н1 К2

б)
2p=2

34 35 36 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33

1 2 3 4

Н1 К1

Рис. 75. Одна фаза двухслойной обмотки с переключением числа полюсов.

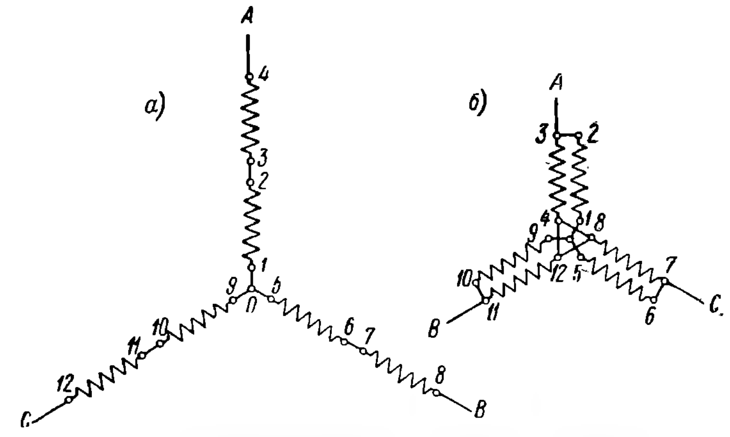


Рис. 76. Схема переключения двухскоростной обмотки: *а* — большее число полюсов — звезда; *б* — меньшее число полюсов — звезда с двумя параллельными ветвями.

направление вращения двигателя при изменении числа полюсов сохранялось неизменным, необходимо одновременно изменять порядок чередования фаз питания. Схема простейшего переключателя, удовлетворяющего этому требованию, дана на рис. 78.

Следует отметить существенную разницу между схемами рис. 76 и 77.

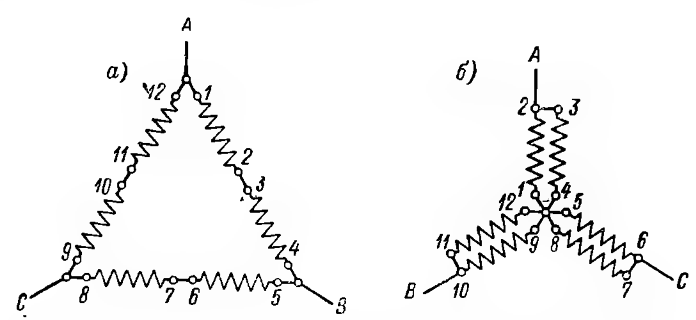


Рис. 77. Схема переключения двухскоростной обмотки: *а* — большее число полюсов — треугольник; *б* — меньшее число полюсов — звезда с двумя параллельными ветвями.

В первой из них при переходе от большего числа полюсов к меньшему число последовательно включенных витков каждой фазы уменьшается в два раза, между тем как фазное напряжение остается неизменным; но согласно равенству (19)

$$w = \frac{0{,}219\ U\ 10^8}{k\ \Phi\ f}$$

Следовательно, если число витков w уменьшилось вдвое, то во столько же раз должно возрасти произведение величины потока Ф на обмоточный коэффициент k, поскольку прочие величины в правой части равенства остаются неизменными.

С другой стороны, согласно равенству (14),

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_в\ \tau\ l\ [мкс].$$

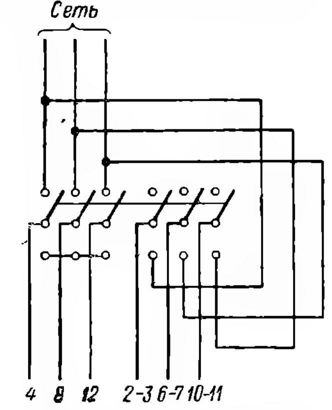


Рис. 78. Переключатель к схемам рис. 76 и 77.

Но при переходе от большего числа полюсов к меньшему величина полюсного деления τ возрастает вдвое; а так как длина l остается неизменной, то при одной и той же величине магнитной индукции $B_в$ поток Ф также должен возрасти вдвое.

Отсюда следует, что если бы обмоточный коэффициент k сохранялся одним и тем же, то при обоих числах полюсов машина имела бы одни и те же значения индукции в зазоре $B_в$; сохрани-

лись бы и значения индукции в зубцах $B_з$ как статора, так и ротора, так как расчетное сечение зубцов удваивается вместе с величиной полюсного деления; но индукции в теле статора B_c и ротора B_p при меньшем числе полюсов, естественно, были бы вдвое выше, чем при большем, поскольку сечения тела статора и ротора остаются прежними.

В действительности обмоточный коэффициент при каждом числе полюсов имеет свое значение; поэтому значения индукций в зазоре и в зубцах изменяются обратно пропорционально обмоточным коэффициентам. Как правило, при меньшем числе полюсов значение обмоточного коэффициента ниже, чем при большем, поэтому индукции в зазоре и в зубцах возрастают.

Если при большем числе полюсов индукции в теле статора и ротора настолько низки, что удвоение их величин при переходе к меньшему числу полюсов не вызывает возражений, следует отдать предпочтение схеме рис. 76. Удвоение суммарного сечения проводников каждой фазы при этом переходе позволяет удвоить потребляемый двигателем ток даже в случае сохранения прежней плотности тока. Если же учесть то, что последняя при большей скорости вращения может быть несколько повышена за счет улучшения условий вентиляции двигателя, а также и то, что при удвоении потребляемой кажущейся мощности довольно заметно возрастают экономические показатели — коэффициент полезного действия и коэффициент мощности, то становится ясно, что номинальная мощность при меньшем числе полюсов может быть взята более чем удвоенной по сравнению с бо́льшим числом полюсов. Таким образом, при обоих числах полюсов степень использования машины получается примерно одинаковой.

Иначе обстоит дело в случае схемы рис. 77. Число последовательно включенных витков в каждой фазе и здесь при переходе от большего числа полюсов к меньшему уменьшается вдвое; но вместе с тем изменяется и сопряжение фаз, вследствие чего фазное напряжение не сохраняется. Если при большем числе полюсов и сопряжении фаз в треугольник фазное напряжение равно линейному, то при меньшем числе полюсов и сопряжении фаз в звезду фазное напряжение становится в $\sqrt{3}$ раз меньшим; следовательно, индукции в зазоре и в зубцах при неизменных обмоточных коэффициентах должны были бы во столько же раз понизиться, а индукции в теле статора и ротора — возрасти в отношении $\frac{2}{\sqrt{3}} = 1{,}154$, т. е. всего лишь на 15,4%. Поэтому если при большем числе полюсов индукция в теле статора настолько значительна, что об удвоении ее при переходе к меньшему числу полюсов не может быть и речи, приходится обратиться к схеме рис. 77. Суммарное сечение проводников в этой схеме не претерпевает изменения, поскольку различие в распределении плотности тока между треугольником и звездой с двумя параллельными ветвями неве-

лико; поэтому и потребляемый ток, а вместе с ним и мощность двигателя при обоих числах полюсов остаются одного и того же порядка.

Этот случай особенно характерен для тех двухскоростных двигателей, у которых меньшим числом полюсов является $2p = 2$ (если только они имеют сердечник не от нормального двухполюсного двигателя с очень большой высотой тела статора). Пример 8, разобранный в § IV, дает ясное представление о ненормальном распределении значений индукции в отдельных участках магнитной цепи такого двигателя.

Общий ход расчета двухскоростного двигателя не отличается от всякого иного; он проводится для какого-нибудь одного из чисел полюсов с одновременной проверкой того, что получается при другом числе полюсов. Можно рекомендовать производить основной расчет для меньшего числа полюсов, однако такой порядок отнюдь не является обязательным.

Обмоточные коэффициенты для катушечных обмоток, переключенных на половинное число полюсов, могут быть получены умножением на 0,707 значений обмоточных коэффициентов для данного числа пазов на полюс и фазу, взятых из таблицы приложения V; следует только помнить, что при меньшем числе полюсов число пазов на полюс и фазу вдвое больше, чем при большем числе полюсов.

Что касается обмоточных коэффициентов двухслойных обмоток, то для меньшего числа полюсов они могут быть взяты непосредственно из этой же таблицы в соответствии с примененным шагом при данном числе пазов на полюс и фазу; для большего же числа полюсов — путем умножения на 0,866 значения, взятого из таблицы в соответствии с шагом и числом пазов на полюс и фазу при этом числе полюсов.

Следует отметить, что нередко в двухскоростных обмотках применяется шаг, являющийся удлиненным при большем числе полюсов и укороченным — при меньшем; это вызывается тем, что в противном случае для меньшего числа полюсов получаются крайне низкие значения обмоточного коэффициента, требующие соответственного увеличения магнитного потока или числа витков.

Зачастую применяется такой шаг, чтобы для большего числа полюсов он был равен учетверенному числу пазов на полюс и фазу, а для меньшего числа полюсов — удвоенному:

$$y = 4q = 2 \cdot 2q = 2q',$$

где под q подразумевается число пазов на полюс и фазу для большего числа полюсов, а под q' — для меньшего.

Пример 18. Требуется определить обмоточные коэффициенты для двухскоростной двухслойной обмотки, имеющей при большем числе полюсов число пазов на полюс и фазу $q = 3$.

Если взять шаг, являющийся диаметральным при большем числе полюсов, как на рис. 75, т. е.

$$y = 3q = 9,$$

то обмоточный коэффициент будет равен произведению 0,866 на значение, взятое из таблицы приложения V соответственно $q = 3$ и $y = 9$:

$$k = 0{,}866 \quad 0{,}960 = 0{,}831.$$

Для меньшего же числа полюсов обмоточный коэффициент может быть взят прямо из таблицы в соответствии с $q' = 2 \quad 3 = 6$ и $y = 9$:

$$k' = 0{,}676,$$

что является очень низким значением, которое было бы желательно увеличить, удлинив шаг.

Если последний взять

$$y = 4q = 2q' = 12,$$

то для большего числа полюсов, согласно предыдущему,

$$k = 0{,}866 \cdot 0{,}831 = 0{,}719,$$

а для меньшего

$$k' = 0{,}828,$$

т. е. получилось обратное соотношение обмоточных коэффициентов — их значения поменялись местами.

Попробуем теперь взять шаг $y = 11$; тогда для большего числа полюсов

$$k = 0{,}866 \cdot 0{,}902 = 0{,}781,$$

а для меньшего

$$k' = 0{,}783,$$

т. е. для обоих чисел полюсов обмоточные коэффициенты почти в точности равны.

Если двухскоростной двигатель имеет фазовый ротор, то обмотка последнего также должна допускать изменение числа полюсов; но для этой цели ротор должен иметь по крайней мере шесть контактных колец с тем, чтобы была возможность применения одной из схем рис. 76 и 77. Так как это связано со значительными конструктивными затруднениями, переключение числа полюсов применяется в двигателях с фазовыми роторами очень редко.

Выше было отмечено, что количество различных чисел полюсов, на которые переключается обмотка статора, принципиально может быть и больше двух. Однако уже при трех различных числах полюсов становится очень трудно создать двигатель, удовлетворительно работающий на всех этих числах полюсов. Электромашиностроительные заводы предпочитают в таких случаях снабжать статор двумя совершенно независимыми обмотками, уложенными в одни и те же пазы, каждая из которых может быть двухскоростной; так, например, одна обмотка переключается на числа полюсов 2 и 4 или 4 и 8, а другая — на 6 и 12. Понятно, что степень использования такого двигателя, у которого часть паза занята проводниками обмотки, не участвующей в данный момент в работе, не может быть высокой; поэтому при перемотке можно пойти на такое устройство только в исключительных случаях.

19. Проверка соотношения чисел пазов статора и ротора

В работе плохо построенных асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами наблюдается ряд ненормальностей, затрудняющих их эксплуатацию, а иногда и вовсе препятствующих ей; к числу таких ненормальностей следует отнести:

1. Прилипание. Двигатель при подключении к источнику питания не приходит во вращение; однако, будучи выведен из неподвижного состояния (на что иногда требуется значительное усилие), самостоятельно разворачивается и в дальнейшей работе никаких ненормальностей не обнаруживает.

2. Застревание. При пуске двигатель сначала разворачивается нормально, но, достигнув определенной скорости, обычно составляющей около $^1/_7$ от номинальной, застревает на ней. Если каким-нибудь посторонним воздействием привести ротор во вращение со скоростью, несколько превышающей это значение, то в дальнейшем двигатель разворачивается и ведет себя вполне нормально.

3. Гудение. В процессе пуска двигатель производит резкий шум, который по достижении нормальной скорости вращения либо исчезает, либо переходит в более или менее сильное гудение. Не говоря уже о тех случаях, когда от двигателя требуется практически бесшумная работа по характеру помещения, в котором он установлен, гудение неприятно действует на слух и потому не должно допускаться.

Причиной всех перечисленных ненормальностей является неудачное соотношение числа полюсов $2p$ и чисел пазов на статоре и роторе Z_1 и Z_2.

Эти ненормальности далеко не всегда бывают полностью устранены даже в двигателях заводского изготовления; тем более они вероятны при перемотках на новое число полюсов. Сплошь и рядом определенное соотношение чисел пазов Z_1 и Z_2 является благоприятным при одном числе полюсов и неблагоприятным при другом; мало того, иногда приходится укомплектовывать статор совершенно случайным ротором, имеющим лишь подходящие диаметр и длину; в этих условиях вероятность неблагоприятного соотношения особенно велика.

Поэтому при перемотке или переключении на новое число полюсов, в том числе и при перемотке односкоростного двигателя на двухскоростной, а тем более при расчете двигателя, первоначальное число полюсов которого неизвестно, следует проверять соотношение чисел пазов статора и ротора.

Для такой проверки можно предложить следующие правила:

1. Числа пазов статора и ротора ни в коем случае не должны быть ни равны, ни кратны друг другу, так как иначе неизбежно будет иметь место прилипание. Практически может идти речь о числе пазов ротора, вдвое меньшем или вдвое большем против числа пазов статора, так как бо́льшие кратности невероятны.

Это правило может быть, таким образом, записано в виде:

$$\left.\begin{aligned} Z_2 &\neq Z_1; \\ Z_2 &\neq \frac{1}{2} Z_1; \\ Z_2 &\neq 2Z_1. \end{aligned}\right\} \qquad (49)$$

2. Число пазов ротора не должно делиться на утроенное число полюсов, так как в противном случае также будет иметь место прилипание, хотя и не в столь сильной степени, как в предыдущем случае.

Это правило может быть записано в следующем виде:

$$Z_2 \neq 2p \cdot 3i, \tag{50}$$

где i — любое целое число: $i = 1, 2, 3\ldots$ и т. д.

3. Число пазов ротора должно удовлетворять также и такому неравенству:

$$Z_2 \neq 2p \cdot 3i + 2p = 2p\ (3i + 1), \tag{51}$$

так как в противном случае возникает опасность застревания, если только $i \leqslant 3$.

4. Если числа пазов статора и ротора близки друг к другу, то они не должны отличаться друг от друга ни на число пар полюсов, ни на число полюсов:

$$\left.\begin{aligned} Z_2 &\neq Z_1 \pm p; \\ Z_2 &\neq Z_1 \pm 2p. \end{aligned}\right\} \tag{52}$$

Если число пазов ротора близко к половине числа пазов статора, то оно не должно отличаться от этой половины на число пар полюсов:

$$Z_2 \neq \frac{1}{2} Z_1 \pm p. \tag{53}$$

Если число пазов ротора близко к удвоенному числу пазов статора, то оно не должно отличаться от этого удвоенного числа на число полюсов:

$$Z_2 \neq 2Z_1 \pm 2p. \tag{54}$$

Несоблюдение одного из этих трех условий ведет также к застреванию.

5. Число пазов ротора, увеличенное или уменьшенное на единицу, не должно делиться на число полюсов, что может быть записано так:

$$Z_2 \neq 2p \cdot 3i \pm 1. \tag{55}$$

Кроме того, оно должно удовлетворять еще и неравенству

$$Z_2 \neq 2p \cdot 3i \pm (2p \pm 1). \tag{56}$$

Если одно из этих двух условий не соблюдено, то двигатель склонен к образованию шумов. Стоит отметить, что оба неравенства предостерегают против нечетных чисел пазов Z_2.

Пример 19. Статор четырехполюсного двигателя имеет $Z_1 = 36$ пазов, ротор же $Z_2 = 42$ паза. Требуется определить, пригоден ли данный двигатель для перемотки на 6 полюсов.

Первое условие соблюдено, так как число пазов ротора не равно ни числу пазов статора, ни удвоенному числу пазов статора, ни половине числа пазов статора.

Второе условие соблюдено и для $2p = 4$, так как Z_2 не делится на $4 \cdot 3 = 12$, и для $2p = 6$, так как оно не делится на $6 \cdot 3 = 18$.

Третье условие удовлетворено для $2p = 4$, так как 42 не делится на 4; но для $2p = 6$ оно не удовлетворяется, так как 42 делится на 6 и частное от деления, т. е. 7, может быть представлено, как

$$7 = 3 \cdot 2 + 1.$$

Четвертое условие удовлетворяется для $2p = 4$, так как

$$Z_1 \pm p = 36 \pm 2 = 38 \text{ или } 34 \neq Z_2,$$

$$Z_1 \pm 2p = 36 \pm 4 = 40 \text{ или } 32 \neq Z_2,$$

но оно не удовлетворяется для $2p = 6$, поскольку

$$Z_1 + 2p = 36 + 6 = 42 = Z_2.$$

Пятое условие удовлетворяется для обоих чисел полюсов, так как Z_2 четно.

Таким образом, данное соотношение чисел пазов статора и ротора благоприятно для четырехполюсного двигателя, но неблагоприятно для шестиполюсного, так как грозит опасностью застревания из-за несоблюдения третьего и четвертого условий; двигатель для перемотки на 6 полюсов не пригоден.

Пример 20. Требуется проверить пригодность этого же двигателя для переделки на двухскоростной с числами полюсов 4 и 2.

Первое условие, как уже было отмечено, соблюдено.

Второе условие не соблюдается для $2p = 2$, так как частное от деления $Z_2 = 42$ на $2p = 2$ кратно 3:

$$42 = 2 \cdot 21 = 2 \cdot 3 \cdot 7.$$

Третье условие соблюдается, поскольку частное от деления $Z_2 = 42$ на $2p = 2$ не может быть представлено в виде $3i + 1$; ближайшими такими числами будут:

$$19 = 3 \cdot 6 + 1$$

$$22 = 3 \cdot 7 + 1.$$

Четвертое и *пятое* условия соблюдены.

Таким образом, при переключении данного двигателя на 2 полюса возникает опасность прилипания из-за несоблюдения второго условия, и двигатель для этого числа полюсов не пригоден.

20. Формуляр расчета обмотки статора

Для того чтобы работа по расчету перемоток протекала бесперебойно и чтобы сами расчеты находились в должном порядке, необходимо вести их по определенной форме; это очень важно в особенности в тех случаях, когда приходится пересматривать большое количество расчетов с целью наведения необходимых справок, например о применявшихся в различных случаях индукциях, плотностях тока и т. д.

Для этой цели может служить предлагаемый формуляр расчета, в котором в удобной для применения последовательности сведены все необходимые величины для расчета обмотки статора.

Два образца таких формуляров, для примера заполненных данными тех расчетов, которые приведены в тексте настоящего руководства, помещены в приложении X.

Формуляр состоит из заголовка, десяти граф различного назначения, обозначенных римскими цифрами, и нескольких дополнительных полос.

В заголовке имеется: в левом верхнем углу листа — место для наименования данного предприятия, а в правом верхнем углу — место для номера формуляра с указанием порядкового номера листа и общего количества листов формуляра, который может содержать помимо этого основного листа еще и иные материалы, как, например, схемы, таблицы и т. п.

Середина заголовка отведена под наименование формуляра и основные сведения о перематываемом двигателе: завод-изготовитель, типовое обозначение, заводский номер и характеристика исполнения, например: открытый, защищенный или закрытый, с протяжной вентиляцией, с поверхностным обдувом или без вентиляции и т. д.

Непосредственно под заголовком помещена полоса, содержащая номинальные данные машины до и после перемотки. Понятно, что такие данные, как завод-изготовитель, тип, номер и номинальные величины до перемотки, могут быть проставлены только в том случае, когда на машине сохранился заводский щиток.

Что касается номинальных данных после перемотки, то такие из них, как мощность, ток статора и коэффициент мощности, проставляются по окончании расчета, когда выяснятся их примерные значения.

Графа I формуляра (пп. 1—10) содержит данные, получаемые из обмера сердечника, и в пояснениях не нуждается. Порядок чередования пунктов этой графы принят такой, при котором они по возможности находятся на одной строке со связанными с ними пунктами соседней графы II.

Графа II (пп. 11—20) отведена для обработки результатов обмера сердечника, которая необходима для расчета обмотки статора; чередование пунктов в ней соответствует естественному ходу обработки.

Графа III (п. 21) представляет поле для помещения эскиза паза статора с размерами; в ней содержится только один п. 21 — площадь паза; вычисление последней необходимо лишь для случаев применения всыпных обмоток с мягкими секциями.

Графа IV (пп. 22—27) содержит сведения, касающиеся устройства обмотки.

Графа V (пп. 28—33) посвящена выбору варианта числа витков в каждой фазе обмотки. Включение в формуляр всех рассматриваемых вариантов, число которых редко превосходит 3—4, очень важно для возможных последующих проверок и перерасчетов.

Графа VI (пп. 34—44) отведена для определения длины лобовой части обмотки из мягких секций. Клетки этой графы должны заполняться согласованными друг с другом значениями всех величин после окончательного выбора диаметра проводника по таблице приложения III.

Графа VII (пп. 45—58) имеет назначение, аналогичное графе VI, но для случая обмотки из жестких секций. Перед заполнением этой графы должна быть произведена проверка укладки жестких секций в графе IX.

Графа VIII (пп. 59—69) заключает в себе данные, получаемые после определения средней длины витка и общего сечения обмотки статора и необходимые для приближенного определения мощности, завершающего расчет.

Графа IX предназначена для проверки укладки жестких секций и определения возможных размеров поперечного сечения проводника. Заполнение ее может производиться на основе таблиц приложения IV в соответствии с имеющимся ассортиментом проводника и изоляционных материалов.

Графа X предусматривается на тот случай, когда в дополнение к данным граф VI или IX требуются пояснения о составе изоляции в виде эскиза.

В нижней полосе формуляра отведено место для даты его составления и подписи составившего его лица, а если это требуется, то и лица, проверившего и одобрившего расчет.

Однако расчетный формуляр, как бы хорошо он ни был составлен и оформлен, как бы удобен он ни был, не может служить непосредственным документом для исполнения обмотки; для лиц, не занимающихся расчетом, было бы чрезвычайно трудно извлекать из всей массы заполняющих его цифр сведения, необходимые для изготовления и укладки обмотки.

Поэтому естественным дополнением к формуляру является так называемая «обмоточная записка» — краткая выдержка из формуляра, содержащая только те сведения, которые необходимы для выполнения обмотки.

В приложении XI даны два образца заполненных бланков обмоточных записок, составленных на основании формуляров приложения X.

Заголовок и подзаголовок обмоточной записки имеют то же устройство, что и в формуляре расчета. Записка имеет два столбца: для обмотки статора и для обмотки ротора.

Первые шесть строк представляют выдержку из формуляра и в объяснениях не нуждаются; что касается следующих семи строк (с седьмой по тринадцатую), то в них внесены некоторые отклонения от формуляра.

Количество различных схем, которые могут находить себе применение в широкой практике перемотки, если и довольно велико, то во всяком случае не бесконечно. Уже после сравнительно недолгой работы обнаруживается, что одни и те же схемы находят себе

применение совершенно без всяких изменений в очень многих двигателях. Вследствие этого довольно быстро составляется альбом таких повторяющихся схем (или таблиц), в дальнейшем только время от времени пополняемый новыми, еще не применявшимися; седьмая строка записки отведена для номера схемы или таблицы по такому альбому.

Для выполнения обмотки не столь существенно, как для расчета, число витков в фазе и число проводников в пазу; но зато гораздо целесообразнее поместить число секций и число витков в секции, что сразу дает представление об устройстве обмотки. Во избежание всяких ошибок и недоразумений, настоятельно рекомендуется словесно определять форму сечения применяемого проводника, для чего выделена особая строка. В строке «марка проводника» проставляются общепринятые условные обозначения; но если секции изготовляются из голой меди, которая изолируется уже после намотки секций, то в этой строке вместо обозначения марки пишется «голый». Размеры проводника как голого, так и изолированного, вписываются: при круглом сечении — с прибавлением знака диаметра «$\varnothing$», а при прямоугольном сечении — в виде произведения сторон, причем до знака умножения пишется всегда меньший размер, а после него — больший.

Последние пять строк достаточно ясны сами по себе; следует лишь указать, что для производства все линейные размеры даются в миллиметрах. В графу «Примечания» вносятся необходимые дополнительные сведения, главным образом касающиеся изоляции и изоляционных материалов; если эти сведения относятся к какой-либо из строк, то перед ними ставится номер строки и буква: А — если они касаются статора и Б — если они относятся к ротору.

Записка имеет в нижней части места для подписей тех же лиц, что и формуляр. В правом нижнем углу как записки, так и формуляра отведены места для взаимных ссылок на их номера.

Исполнение бланков формуляра и обмоточной записки типографским способом вовсе не обязательно; при ограниченном расходе тех и других можно применить их печатание литографским способом или при помощи стеклографа; очень удобны также бланки, отпечатанные светокопировальным способом; они обходятся при этом несколько дороже, чем литографированные, но зато могут всегда быть отпечатаны с одного и того же оригинала, который целесообразно выполнять на полотняной кальке для увеличения срока его службы.

21. Пояснения к формуляру расчета обмотки статора

Графа I. Обмер сердечника статора

1. Диаметр наружный $D_н$ [*см*] — По обмеру.
2. Диаметр внутренний D [*см*] — По обмеру.
3. Длина полная $l_п$ [*см*] — По обмеру.
4. Число пазов общее Z (по подсчету).

5. Толщина листов Δ [*мм*] (определяется подсчетом числа листов на небольшом отрезке длины).

6. Изоляция листов.

7. Число поперечных вентиляционных каналов $n_к$
8. Ширина поперечных вентиляционных каналов $b_к$ [*см*]
9. Число рядов продольных вентиляционных каналов $m_к$
10. Диаметр продольных вентиляционных каналов $d_к$ [*см*]

} По обмеру.

Графа II. Обработка обмера сердечника

11. Число пар полюсов

$$p = \frac{60f}{n_0}. \tag{3}$$

12. Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \ [см]. \tag{4}$$

13. Длина расчетная:

а) при наличии поперечных вентиляционных каналов

$$l = l_п - n_к b_к \ [см]; \tag{5}$$

б) при отсутствии поперечных вентиляционных каналов

$$l = l_п \ [см]. \tag{5a}$$

14. Площадь полюса

$$Q_в = \tau l \ [см^2]. \tag{6}$$

15. Коэффициент заполнения стали k_0 (берется по табл. 1, § 4).

16. Длина стали чистая:

а) при наличии поперечных вентиляционных каналов

$$l_0 = k_0(l_п - n_к b_к) \ [см]; \tag{7}$$

б) при отсутствии поперечных вентиляционных каналов

$$l_0 = k_0 l \ [см]. \tag{7a}$$

17. Высота тела статора (если не измерена непосредственно)

$$h_c = \frac{1}{2}(D_н - D - 2h_п) \ [см]. \tag{8}$$

18. Сечение тела статора:

а) при отсутствии продольных вентиляционных каналов

$$Q_c = h_c l_0 \ [см^2]; \tag{9}$$

б) при наличии продольных вентиляционных каналов

$$Q_c = \left(h_c - \frac{2}{3} m_к d_к\right) l_0 \ [см^2]. \tag{9a}$$

19. Ширина зубца расчетная (если она не постоянна по высоте)

$$b_з = \frac{1}{3}\left(2b_з' - b_з''\right) [см]. \tag{10}$$

20. Сечение зубцов

$$Q_з = \frac{Z b_з l_0}{2p} \ [см^2]. \tag{11}$$

Графа III. Эскиз паза статора

21. Площадь паза $q_п$ [$мм^2$] (только для обмоток с мягкими секциями; вычисляется по одной из формул приложения I).

Графа IV. Данные обмотки статора

22. Тип обмотки (выбирается по соображениям § 6).
23. Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{Z}{6p}. \qquad (12)$$

24. Шаг y } Берутся по таблице приложения V.
25. Обмоточный коэффициент k }
26. Число параллельных ветвей a.
27. Сопряжение фаз.

Графа V. Выбор числа витков в фазе

28. Число проводников в пазу $s_п$ (пробы; берутся по предварительному подсчету).
29. Число витков в фазе

$$w = \frac{Zs_п}{6a}. \qquad (22)$$

30. Магнитный поток

$$\Phi = \frac{0{,}219U \cdot 10^8}{kfw} \; [мкс]. \qquad (20)$$

31. Индукция в зазоре

$$B_в = 1{,}57\frac{\Phi}{Q_в} \; [гс]. \qquad (23)$$

32. Индукция в зубцах статора

$$B_з = 1{,}57\frac{\Phi}{Q_з} \; [гс]. \qquad (24)$$

33. Индукция в теле статора

$$B_с = \frac{\Phi}{2Q_с} \; [гс]. \qquad (25)$$

Графа VI. Обмотка из мягких секций

34. Марка проводника (выбирается в соответствии с наличием).
35. Коэффициент заполнения паза $f_п$ (берется на основании соображений § 12).
36. Число параллельных сечений a' (принимается наименьшим, при котором диаметр проводника еще не превосходит пределов, допустимых с точки зрения удобства вкладывания секций в пазы).
37. Сечение проводника с изоляцией

$$q' = \frac{q_п f_п}{a' s_п} [мм^2]. \qquad (27)$$

38. Сечение проводника без изоляции q [$мм^2$]
39. Диаметр проводника без изоляции d [$мм$]
40. Диаметр проводника с изоляцией d' [$мм$]

} Берутся по таблицам приложения III.

41. Средняя ширина секции

$$T = \frac{\pi (D + h_п) y}{Z} \ [см]. \quad (28)$$

42. Коэффициент длины K
43. Постоянное слагаемое L [$см$]

} Берутся по табл. 2, § 14.

44. Длина лобовой части

$$l_л = KT + L \ [см]. \quad (29)$$

Графа VII. Обмотка из жестких секций

45. Число параллельных сечений a''
46. Ширина меди с изоляцией B [$мм$]
47. Высота меди с изоляцией H [$мм$]

} Определяются на основании проверки укладки жестких секций по графе IX.

48. Длина прямой части секции M [$см$] (берется по табл. 3, § 15).
49. Радиус закругления головки секции R [$см$] (берется по табл. 6, § 15).
50. Зазор в наклонной части между соседними секциями Δ_2 [$мм$] (берется по табл. 4, § 15).
51. Расстояние между осями сечений секций в наклонной части

$$f_c = B + 2{,}6 \ \Delta_1 + \Delta_2 \ [мм]. \quad (32)$$

52. Расстояние между осями сечений секций в прямой части

$$t_c = b_п + b'_з \ [мм]. \quad (33)$$

53 Отношение расстояний

$$f_c : t_c.$$

54. Коэффициент длины K_1 (берется по табл. 5, § 15).
55. Коэффициент вылета K_2 (берется по табл. 7, § 15).
56. Средняя ширина секции

$$T = \frac{\pi (D + h_п) y}{Z} \ [см]. \quad (28)$$

57. Длина лобовой части

$$l_л = 2M + K_1 T + \pi \left(R + \frac{H}{2}\right) \ [см]. \quad (34)$$

58. Вылет лобовой части

$$S = M + K_2 T + R + H \ [см]. \quad (35)$$

Графа VIII. Общие данные

59. Средняя длина витка

$$l_в = 2 (l_п + l_л) \ [см]. \quad (31)$$

60. Общее сечение меди

$$q_a = a' q \ [мм^2].$$

61. Вес меди без изоляции

$$G = 26{,}7\ waa'\,ql_{\text{в}} \cdot 10^{-5}\ [\textit{кг}]. \qquad (41)$$

62. Вес меди с изоляцией:

а) для прямоугольного сечения

$$G' = 1{,}04G\ [\textit{кг}]; \qquad (42)$$

б) для круглого сечения

$$G' = \left[0{,}876 + 0{,}124 \left(\frac{d'}{d} \right)^2 \right]\ [G\ \textit{кг}]. \qquad (43)$$

63. Сопротивление фазы при 15°C

$$r = \frac{wl_{\text{в}}}{5700\ aa'q}\ [\textit{ом}]. \qquad (44)$$

64. Плотность тока $s_{\text{а}}$ [$a/\textit{мм}^2$] (берется по приложению VII).

65. Ток в проводнике

$$I_{\text{а}} = a'\,qs_{\text{а}}\,[a]. \qquad (46)$$

66. Линейная нагрузка (проверяется по приложению VII).

$$A = \frac{Zs_{\text{п}}I}{2p\tau a}\ [a/\textit{см}]. \qquad (45)$$

67. Кажущаяся мощность

$$P = \frac{\sqrt{3}\ UI}{1000}\ [\textit{ква}]. \qquad (48)$$

68. Коэффициент мощности $\cos\ \varphi$ } Берутся по приложению VIII.

69. Коэффициент полезного действия η [%] }

Заголовок. Полезная мощность

$$P_2 = \frac{\sqrt{3}\ UI\eta\cos\varphi}{1000\ \ 100}\ [\textit{квт}]. \qquad (47)$$

Фазный ток

$$I = I_{\text{а}}\ a\ [a].$$



ПРИЛОЖЕНИЯ

Формулы для определения площадей пазов статора наиболее употребительных форм

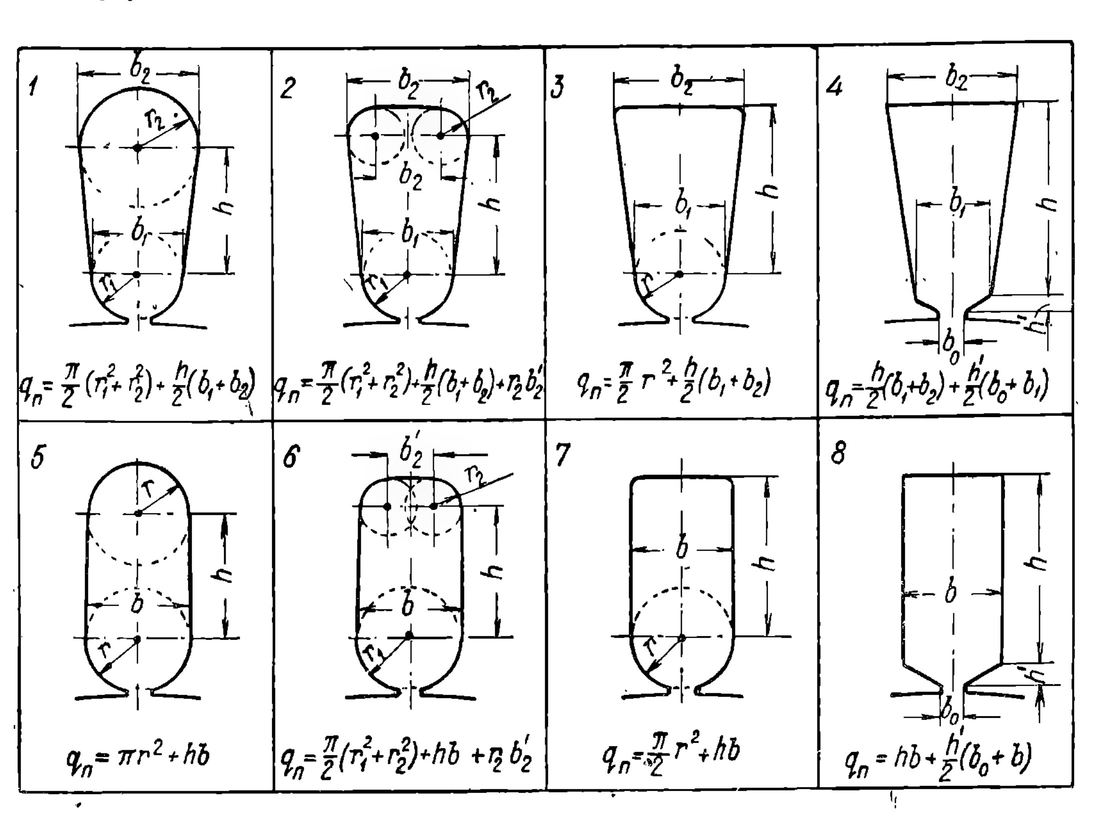


Таблица выполнимых чисел пазов на полюс и фазу для трехфазных обмоток

n_0 [об/мин]	2p \ Z	12	18	24*	30	36*	42	48*	54*	60*	66	72*	78	84	90*	96*	102	108*	114	120*
3000	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1500	4	1	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5	5 1/2	6	—	—	—	—	—	—	—	—
1000	6	—	1	—	—	2	—	—	3	—	—	4	—	—	5	—	—	6	—	—
750	8	—	—	1	1 1/4	1 1/2	1 3/4	2	2 1/4	2 1/2	2 3/4	3	3 1/4	3 1/2	3 3/4	4	4 1/4	4 1/2	4 3/4	5
600	10	—	—	—	1	1 1/5	1 2/5	1 3/5	1 4/5	2	2 1/5	2 2/5	2 3/5	2 4/5	3	3 1/5	3 2/5	3 3/5	3 4/5	4
500	12	—	—	—	—	1	—	—	1 1/2	—	—	2	—	—	2 1/2	—	—	3	—	—

Дополнительная таблица выполнимых чисел пазов на полюс и фазу для двухслойных обмоток

n_0 [об/мин]	2p \ Z	9	15	21	27*	33	39	45*	51	57	63*	69	75	81*	87	93	99	105	111	117
3000	2	1 1/2	2 1/2	3 1/2	4 1/2	5 1/2	6 1/2	7 1/2	8 1/2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1500	4	—	1 1/4	1 3/4	2 1/4	2 3/4	3 1/4	3 3/4	4 1/4	4 3/4	5 1/4	5 3/4	—	—	—	—	—	—	—	—
1000	6	—	—	—	1 1/2	—	—	2 1/2	—	—	3 1/2	—	—	4 1/2	—	—	5 1/2	—	—	—
750	8	—	—	—	1 1/8	1 3/8	1 5/8	1 7/8	2 1/8	2 3/8	2 5/8	2 7/8	3 1/8	3 3/8	3 5/8	3 7/8	4 1/8	4 3/8	—	—
600	10	—	—	—	—	1 1/10	1 3/10	1 1/2	1 7/10	1 9/10	2 1/10	2 3/10	2 1/2	2 7/10	2 9/10	3 1/10	3 3/10	3 3/2	3 7/10	3 9/10
500	12	—	—	—	—	—	—	1 1/4	—	—	1 3/4	—	—	2 1/4	—	—	2 3/4	—	—	3 1/4

Примечание. Нанболее распространенные обшие числа пазов Z отмечены звездочкой *.

Провода медные обмоточные круглого сечения

А. Марки проводника

ПЭЛШО — лакостойкая эмаль и один слой шелковой пряжи;
ПЭЛШД — лакостойкая эмаль и два слоя шелковой пряжи;
ПЭЛБО — лакостойкая эмаль и один слой хлопчатобумажной пряжи;
ПЭЛБД — лакостойкая эмаль и два слоя хлопчатобумажной пряжи;
ПЭЛБТ — лакостойкая эмаль и один слой подклеенной телефонной бумаги;
ПЭЛБВ — лакостойкая эмаль и один слой подклеенной длииноволокнистой бумаги;
ПШД — два слоя шелковой пряжи;
ПБО — один слой хлопчатобумажной пряжи;
ПБД — два слоя хлопчатобумажной пряжи;
ПБОО — один слой хлопчатобумажной пряжи и одиа оплетка из хлопчатой бумаги;
ПЭТСО — эмаль и один слой стекляиной пряжн, подклеенной и пропитаиной лаком;
ПСД — два слоя стеклянной пряжи, подклеенной и пропитанной лаком;
ПДА — одии слой асбестового волокна, подклеенного и пропитанного лаком.

Б. Двухсторонняя толщина изоляции проводников различных марок

Марка проводника	Диаметр голого проводника *d* [*мм*]										
	0,05 0,09–	0,10– 0,19	0,20– 0,25	0,27– 0,29	0,31– 0,35	0,38– 0,49	0,51– 0,69	0,72– 0,96	1,00– 1,45	1,50– 2,10	2,26– 5,20
ПЭЛШО	0,070	0,075	0,090	0,100	0,105	0,110	0,115	0,125	0,135	0,155	—
ПЭЛШД	—	—	—	—	—	—	—	0,190	—	—	—
ПЭЛБО	—	—	0,125	0,155	0,160	0,165	0,170	0,180	0,210	0,210	—
ПЭЛБД	—	—	—	—	—	—	—	0,280	0,330	0,330	—
ПЭЛБТ	—	—	—	—	—	—	—	—	0,210	0,210	—
ПЭЛБВ	—	—	—	—	—	—	0,120	0,125	0,140	—	—
ПШД	Изготовляется по особым техническим условиям										
ПБО	—	—	0,100	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,140	0,140	—
ПБД	—	—	0,190	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,270	0,270	0,330
ПБОО	—	—	—	—	—	—	—	—	0,850	0,850	0,850
ПЭТСО	—	—	—	—	0,200	0,200	0,200	0,220	0,220	0,240	—
ПСД	—	—	—	—	0,230	0,230	0,250	0,250	0,270	0,270	0,330
ПДА	—	—	—	—	—	—	—	—	0,300	0,300	0,350

Прнмечание. Составлеио на осиовании ГОСТ 6324-52 и ГОСТ 7019-54.

В. Номинальные диаметры d, сечения q, веса g и сопротивления R 1 км при 15° С меди обмоточной круглой

Диаметр d мм	Сечение q мм²	Вес 1 км g кг	Сопротивление 1 км R ом	Диаметр d мм	Сечение q мм²	Вес 1 км g кг	Сопротивление 1 км R ом
0,05	0,00196	0,01746	9100	(0,77)	0,466	4,14	36,9
0,06	0,00283	0,0252	6310	0,80	0,503	4,47	34,2
0,07	0,00385	0,0342	4630	(0,83)	0,541	4,81	31,8
0,08	0,00503	0,0447	3550	0,86	0,581	5,16	29,6
0,09	0,00636	0,0566	2810	(0,90)	0,636	5,66	27,0
0,10	0,00785	0,0698	2270	0,93	0,679	6,04	25,3
0,11	0,00950	0,0845	1813	(0,96)	0,724	6,43	23,8
0,12	0,01131	0,1005	1524	1,00	0,785	6,98	21,9
0,13	0,01327	0,1180	1296	(1,04)	0,849	7,55	20,3
0,14	0,01539	0,1368	1118	1,08	0,916	8,14	18,79
0.15	0,01767	0,1571	974	(1,12)	0,985	8,75	17,47
0,16	0,0201	0,1788	856	1,16	1,057	9,40	16,28
0,17	0,0227	0,202	758	(1,20)	1,131	10,05	15,22
0,18	0,0255	0,226	674	1,25	1,227	10,91	14,02
0,19	0,0284	0,252	606	(1,30)	1,327	11,80	12,96
0,20	0,0314	0,279	548	1,35	1,431	12,73	12,01
0,21	0,0346	0,308	497	(1,40)	1,539	13,69	11,18
0,23	0,0415	0,369	415	1,45	1,651	14,68	10,41
0,25	0,0491	0,436	351	(1,50)	1,767	15,71	9,74
0,27	0,0573	0,509	300	1,56	1,911	16,99	9,00
0,29	0,0661	0,587	260	(1,62)	2,06	18,32	8,36
0,31	0,0755	0,671	228	1,68	2,22	19,71	7,75
0,33	0,0855	0,760	201	(1,74)	2,38	21,1	7,23
0,35	0,0962	0,855	178,8	1,81	2,57	22,9	6,70
0,38	0,1134	1,008	151,8	(1,88)	2,78	24,7	6,19
0,41	0,1320	1,173	130,3	1,95	2,99	26,5	5,76
0,44	0,1521	1,352	113,2	(2,02)	3,20	28,5	5,38
0,47	0,1735	1,542	99,2	2,10	3,46	30,8	4,97
(0,49)	0,1886	1,676	91,3	2,26	4,01	35,7	4,29
0,51	0,204	1,816	84,4	2,44	4,68	41,6	3,68
(0,53)	0,221	1,961	77,8	2,63	5,43	48,3	3,17
0,55	0,238	2,11	72,3	2,83	6,29	55,9	2,73
(0,57)	0,255	2,27	67,5	3,05	7,31	65,0	2,35
0,59	0,273	2,43	63,0	3,28	8,45	75,1	2,04
(0,62)	0,302	2,68	57,0	3,53	9,79	87,0	1,758
0,64	0,322	2,86	53,4	3,80	11,34	100,8	1,518
(0,67)	0,353	3,13	48,7	4,10	13,20	117,4	1,303
0,69	0,374	3,32	46,0	4,50	15,90	141,4	1,082
(0,72)	0,407	3,62	42,3	4,80	18,10	160,9	0,951
0,74	0,430	3,82	40,0	5,20	21,2	188,8	0,812

Примечание. Диаметры проводников в скобках являются мало употребительными.

А. Марки проводника

ПШД — два слоя шелковой пряжи;
ПБО — один слой хлопчатобумажной пряжи;
ПБД — два слоя хлопчатобумажной пряжи;
ПБОО — один слой хлопчатобумажной пряжи и одна оплетка из хлопчатой бумаги;
ПСД — два слоя стеклянной пряжи, подклеенной и пропитанной лаком;
ПДА — один слой асбестового волокна, подклеенного и пропитанного лаком.

Примечание. Для проводника марки ПДА первая цифра пред стороны сечения *b*, а вторая — в направлении более узкой стороны се
Составлено на основании ГОСТ 434-53, ГОСТ 6324-52 и ГОСТ 7019-54.

В. Номинальные размеры a и b [мм] и расчетные

b \ a	0,90	1,00	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,56	1,68	1,81	1,95	2,10	2,26
2,10	1,72	1,89	2,06	2,23	2,42	2,63	2,84	3,07	3,32	3,59	—	**3,92**	—
2,26	1,86	2,05	2,23	2,41	2,62	2,84	3,07	3,32	3,59	3,83	—	—	**4,63**
2,44	2,03	2,23	2,43	2,62	2,84	3,08	3,33	3,60	3,89	4,21	4,55	4,64	—
2,63	2,20	2,42	2,63	2,84	3,08	3,34	3,60	3,80	4,21	4,55	4,92	5,04	5,46
2,83	2,38	2,62	2,85	3,07	3,33	3,61	3,89	4,20	4,54	4,91	5,31	5,46	5,92
3,05	—	2,84	3,08	3,33	3,60	3,91	4,21	4,55	4,91	5,31	5,74	5,93	6,41
3,28	—	3,07	3,33	3,60	3,89	4,22	4,55	4,91	5,30	5,73	6,19	6,41	6,93
3,53	—	3,32	3,60	3,89	4,20	4,56	4,91	5,30	5,72	6,18	6,67	6,93	7,50
3,8	3,25	3,59	3,89	4,20	4,54	4,92	5,30	5,72	6,17	6,67	7,20	7,50	8,11
4,1	—	3,89	4,22	4,55	4,92	5,33	5,74	6,19	6,68	7,21	7,79	8,13	8,79
4,4	—	4,19	4,54	4,89	5,29	5,73	6,17	6,65	7,18	7,75	8,37	8,76	9,46
4,7	—	4,49	4,87	5,24	5,67	6,14	6,61	7,12	7,79	8,30	8,96	9,39	10,1
5,1	—	4,89	5,30	5,71	6,17	6,68	7,19	7,75	8,36	9,02	9,74	10,2	11,0
5,5	—	5,29	5,73	6,17	6,67	7,22	7,77	8,37	9,03	9,75	10,5	11,1	11,9
5,9	—	5,69	6,16	6,63	7,17	7,76	8,35	8,99	9,70	10,5	11,3	11,9	12,8
6,4	—	6,19	6,70	7,21	7,79	8,43	9,07	9,77	10,6	11,4	12,3	12,9	14,0
6,9	—	6,69	7,24	7,79	8,42	9,11	9,79	10,6	11,4	12,3	13,3	14,0	15,1
7,4	—	7,19	7,78	8,37	9,04	9,78	10,5	11,3	12,6	13,3	14,2	15,0	16,2
8,0	—	7,79	8,43	9,07	9,79	10,6	11,4	12,3	13,2	14,4	15,4	16,3	17,6
8,6	—	8,39	9,08	9,77	10,6	11,4	12,3	13,2	14,2	15,5	16,6	17,6	18,9
9,3	—	—	9,83	10,58	11,4	12,4	13,3	14,3	15,4	16.6	17,9	19,0	20,5
10,0	—	—	—	11,4	12,3	13,3	14,3	15,4	16,6	17,9	19,3	20,5	22,1
10,8	—	—	—	—	—	14,4	15,5	16,6	17,9	19,3	20,9	22,2	23,9
11,6	—	—	—	—	—	15,5	16,6	17,9	19,3	20,8	22,4	23,9	25,7
12,5	—	—	—	—	—	—	17,9	19,4	20,8	22,4	24,2	25,8	27,8
13,5	—	—	—	—	—	—	—	20,8	22,5	24,2	26,1	27,9	30,0
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—	24,2	26,1	28,0	30,0	32,3

Примечания. 1. Расчетные сечения даны с учетом закругления
2. Жирной чертой ограничена область поставки проводника марки
3. Сечения, показанные жирным шрифтом, выпускаются только

прямоугольного сечения

Б. Двухсторонняя толщина изоляции проводников различных марок

Марка проводника	Меньшая сторона сечения *a* [*мм*]		
	0,9—1,95	2,1—3,8	4,1—5,5
ПШД	0,15	—	—
ПБО	0,14	0,175	0,23
ПБД	0,27	0,33	0,44
ПБОО	0,88	0,88	0,88
ПСД	0,27	0,33	0,40
ПДА	0,40/0,35	0,40/0,35	0,40/0,40

ставляет двухстороннюю толщину изоляции в направлении более широкой чения *a*.

сечения q [*мм*²] *меди обмоточной прямоугольной*

2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,80	4,10	4,40	4,70	5,10	5,50	*a*/*b*
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,10
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,26
5,37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,44
5,94	**6,44**	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,63
6,43	—	**7,53**	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,83
6,96	7,54	8,15	—	**8,72**	—	—	—	—	—	—	—	3,05
7,52	8,15	8,80	9,51	10,3	—	—		—	—	—	—	3,28
8,13	8,80	9,51	10,3	11,1	**12,0**	**12,9**	—	—	—	—	—	3,53
8,79	9,51	10,3	11,1	12,0	—	**13,9**	—	—	—	—	—	3,8
9,52	10,3	11,1	12,0	13,0	14,0	15,1	—	**15,9**	—	—	—	4,1
10,2	11,1	12,0	12,9	13,9	15,0	16,2	17,1	**18,5**	—	—	—	4,4
11,0	11,9	12,8	13,8	14,9	16,1	17,4	18,4	—	**21,2**	—	—	4,7
11,9	12,9	13,9	15,1	16,2	17,5	18,9	20,0	21,5	—	**25,1**	—	5,1
12,9	14,0	15,1	16,3	17,5	18,9	20,4	21,7	23,3	25,0	27,2	—	5,5
13,9	15,0	16,2	17,5	18,9	20,3	21,9	23,3	25,1	26,8	29,2	—	5,9
15,1	16,3	17,6	19,0	20,5	22,1	23,8	25,3	27,3	29,2	31,7	34,3	6,4
16,3	17,7	19,0	20,6	22,1	23,1	25,7	27,4	29,5	31,5	34,3	37,1	6,9
17,6	19,0	20,4	22,1	23,6	25,6	27,6	29,4	31,7	33,9	36,8	39,8	7,4
19,0	20,5	22,1	23,9	25,7	27,7	29,9	31,9	34,3	36,7	39,9	43,1	8,0
20,5	22,1	23,8	25,7	27,7	29,9	32,2	34,4	36,9	39,5	43,0	46,4	8,6
22,2	24,0	25,8	27,9	30,0	32,3	34,8	37,2	40,0	42,8	46,5	50,3	9,3
23,9	25,8	27,8	30,0	32,3	34,8	37,5	40,1	43,1	46,1	50,1	54,1	10,0
25,9	27,9	30,1	32,4	34,9	37,6	40,5	43,4	46,6	49,9	54,2	58,5	10,8
27,8	30,0	32,3	34,9	37,5	40,5	43,6	46,7	50,1	53,6	58,3	62,9	11,6
30,0	32,4	34,9	37,6	40,5	43,6	47,0	50,4	54,1	57,9	62,9	67,9	12,5
32,4	35,0	37,7	40,7	43,8	47,2	50,8	54,5	58,5	62,6	68,0	73,4	13,3
34,9	37,6	40,5	43,7	47,1	50,6	54,6	58,6	62,9	67,3	74,1	78,9	14,5

углов поперечных сечений.
ПДА.
марки ПДА.

Таблица обмоточных коэффи

q	Двухслойные обмотки								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$1^1/_5$	0,732	**0,924**	0,942	0,783	—	—	—	—	—
$1^1/_4$	0,711	**0,910**	0,951	0,829	—	—	—	—	—
$1^2/_5$	—	0,861	**0,953**	0,913	0,747	—	—	—	—
$1^1/_2$	—	0,831	**0,945**	0,945	0,831	—	—	—	—
$1^3/_5$	—	0,795	**0,923**	0,954	0,883	0,718	—	—	—
$1^3/_4$	—	0,747	0,890	**0,953**	0,932	0,828	—	—	—
$1^4/_5$	—	0,732	0,877	**0,949**	0,941	0,854	0,695	—	—
2	—	0,683	0,837	**0,933**	0,966	0,933	0,837	0,683	—
$2^1/_5$	—	—	0,778	0,887	**0,946**	0,951	0,903	0,804	—
$2^1/_4$	—	—	0,766	0,877	**0,941**	0,954	0,915	0,827	0,695
$2^2/_5$	—	—	0,732	0,847	**0,923**	0,954	0,941	0,883	0,782
$2^1/_2$	—	—	0,711	0,829	**0,910**	0,951	0,951	0,910	0,829
$2^3/_5$	—	—	0,689	0,807	0,893	**0,943**	0,954	0,927	0,863
$2^3/_4$	—	—	—	0,778	0,869	**0,928**	0,954	0,946	0,903
$2^4/_5$	—	—	—	0,769	0,861	**0,923**	0,953	0,949	0,913
3	—	—	—	0,735	0,831	**0,902**	0,945	0,960	0,945
$3^1/_5$	—	—	—	0,697	0,794	0,870	**0,923**	0,951	0,953
$3^1/_4$	—	—	—	0,689	0,786	0,863	**0,917**	0,948	0,954
$3^2/_5$	—	—	—	—	0,762	0,841	**0,901**	0,939	0,955
$3^1/_2$	—	—	—	—	0,747	0,828	0,890	**0,932**	0,953
$3^3/_5$	—	—	—	—	0,732	0,813	0,877	**0,923**	0,945
$3^3/_4$	—	—	—	—	0,710	0,792	0,859	**0,908**	0,941
$3^4/_5$	—	—	—	—	0,703	0,785	0,852	**0,903**	0,937
4	—	—	—	—	0,677	0,760	0,829	0,885	**0.925**
$4^1/_4$	—	—	—	—	—	0,725	0,796	0,855	**0,901**
$4^1/_2$	—	—	—	—	—	0,695	0,766	0,827	0,877
$4^3/_4$	—	—	—	—	—	—	0,737	0,800	0,852
5	—	—	—	—	—	—	0,711	0,774	0,829
6	—	—	—	—	—	—	—	0,676	0,732

Примечание. Жирным шрифтом отмечены значения обмоточиых

циентов трехфазных обмоток

при шаге y, равном								q
11	12	13	14	15	16	17	18	
—	—	—	—	—	—	—	—	$1\frac{1}{5}$
—	—	—	—	—	—	—	—	$1\frac{1}{4}$
—	—	—	—	—	—	—	—	$1\frac{2}{5}$
—	—	—	—	—	—	—	—	$1\frac{1}{2}$
—	—	—	—	—	—	—	—	$1\frac{3}{5}$
—	—	—	—	—	—	—	—	$1\frac{3}{4}$
—	—	—	—	—	—	—	—	$1\frac{4}{5}$
—	—	—	—	—	—	—	—	2
—	—	—	—	—	—	—	—	$2\frac{1}{5}$
—	—	—	—	—	—	—	—	$2\frac{1}{4}$
—	—	—	—	—	—	—	—	$2\frac{2}{5}$
0,711	—	—	—	—	—	—	—	$2\frac{1}{2}$
0,764	—	—	—	—	—	—	—	$2\frac{3}{5}$
0,827	0,722	—	—	—	—	—	—	$2\frac{3}{4}$
0,844	0,747	—	—	—	—	—	—	$2\frac{4}{5}$
0,902	0,831	0,735	—	—	—	—	—	3
0,930	0,882	0,811	0,718	—	—	—	—	$3\frac{1}{5}$
0,936	0,893	0,827	0,740	—	—	—	—	$3\frac{1}{4}$
0,948	0,919	0,868	0,796	0,706	—	—	—	$3\frac{2}{5}$
0,953	0,932	0,890	0,828	0,747	—	—	—	$3\frac{1}{2}$
0,955	0,941	0,907	0,853	0,782	0,695	—	—	$3\frac{3}{5}$
0,955	0,950	0,927	0,886	0,827	0,753	—	—	$3\frac{3}{4}$
0,954	0,952	0,932	0,894	0,840	0,770	0,685	—	$3\frac{4}{5}$
0,949	0,958	0,949	0,925	0,885	0,829	0,760	0,677	4
0,933	0,951	0,955	0,944	0,919	0,880	0,827	0,762	$4\frac{1}{4}$
0,915	0,941	0,954	0,954	0,941	0,915	0,877	0,827	$4\frac{1}{2}$
0,894	0,926	0,946	0,955	0,952	0,937	0,912	0,875	$4\frac{3}{4}$
0,874	0,910	0,936	0,951	0,957	0,951	0,936	0,910	5
0,783	0,828	0,867	0,898	0,924	0,942	0,953	0,956	6

коэффициентов при наиболее рекомендуемых значениях шага.

Таблица обмоточных коэффициентов трехфазных обмоток

q	Катушечные обмотки	Цепные обмотки при шаге y, равном							
		3	5	7	9	11	13	15	17
$1\frac{1}{5}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$1\frac{1}{4}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$1\frac{2}{5}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$1\frac{1}{2}$	0,960	0,831	**0,945**	—	—	—	—	—	—
$1\frac{3}{5}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$1\frac{3}{4}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$1\frac{4}{5}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	0,966	0,707	**0,966**	0,966	0,707	—	—	—	—
$2\frac{1}{5}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$2\frac{1}{4}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$2\frac{2}{5}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$2\frac{1}{2}$	0,957	—	0,829	**0,951**	0,910	0,711	—	—	—
$2\frac{3}{5}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$2\frac{3}{4}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$2\frac{4}{5}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	0,960	—	0,735	0,902	**0,960**	0,902	0,735	—	—
$3\frac{1}{5}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$3\frac{1}{4}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$3\frac{2}{5}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$3\frac{1}{2}$	0,956	—	—	0,828	0,932	**0,953**	0,890	0,747	—
$3\frac{3}{5}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$3\frac{3}{4}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$3\frac{4}{5}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	0,958	—	—	0,766	0,892	**0,958**	0,958	0,892	0,766
$4\frac{1}{4}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$4\frac{1}{2}$	0,955	—	—	0,695	0,827	0,915	**0,954**	0,941	0,877
$4\frac{3}{4}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	0,957	—	—	—	0,774	0,874	0,936	**0,957**	0,936
6	0,956	—	—	—	0,679	0,786	0,870	0,927	**0,956**

Примечание. Жирным шрифтом отмечены значения обмоточных коэффициентов при наиболее рекомендуемых значениях шага.

Примеры изоляции обмоток

А. Двухслойные обмотки с жесткими секциями

I. Для машин с полуоткрытыми пазами до 500 *в*. В пазу 4 стороны полусекций. Марка проводника ПБД

Пазовая часть	Поз.	Наименование	По ширине		По высоте	
			число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*
Рис. 1, *а*.	1	Изоляция полусекций — бумага телефонная лакированная 0,07 *мм* $1^1/_4$ слоя	6	0,42	4	0,28
	2	Изоляция паза — картон электротехнический пропитанный 0,15 *мм* $1^1/_4$ слоя	2	0,30	3	0,45
	3	Изоляция паза — лакоткань 0,2 *мм* $1^1/_4$ слоя	2	0,40	3	0,60
	4	» » — картон электротехнический пропитанный 0,2 *мм* $1^1/_4$ слоя	2	0,40	3	0,60
	5	Разбухание изоляции от пропитки	—	0,40	—	0,40
		Итого	—	1,92	—	2,33
	6	Прокладка на дно паза — картон электротехнический	—	—	1	0,20
	7	Прокладка между слоями — картон электротехнический	—	—	1	0,50
	8	Зазор на укладку не менее	—	0,80	—	1,00
		Всего	—	2,72	—	4,03

Продолжение

Лобовая часть	Поз.	Наименование	На 2 стороны	
			число слоев	общая толщина *мм*
9	9	Лента миткалевая 0,15 *мм* 1 ряд вполнахлеста	4	0,60
	10	Разбухание от пропитки	—	0,20
Рис. 1, *б*		Всего	—	0,80

2. Для машин с открытыми пазами до 500 *в*.

Один или два проводника по ширине. Марка проводника — ПБД

Пазовая часть	Поз.	Наименование	По ширине		По высоте	
			число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*
1	1	Прокладка между рядами по высоте — бумага кабельная, пропитанная лаком 0,2 *мм*, 1 слой	(1)	(0,2)	—	—
2	2	Изоляция секции — лента тафтяная 0,18 *мм* 1 ряд вполнахлеста	4	0,72	8	1,44
3	3	Изоляция паза — лакоткань 0,2 *мм* $1^1/_4$ слоя	2	0,40	3	0,60
6, 4	4	» » — картон электротехнический пропитанный 0,2 *мм* $1^1/_4$ слоя	2	0,40	3	0,60
	5	Разбухание картона от пропитки	—	0,12	—	0,18
Рис. 2, *а*		Итого	—	1,64 (1,84)	—	2,82

Продолжение

Пазовая часть	Поз.	Наименование	По ширине		По высоте	
			число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*
	6	Прокладка между слоями — картон электротехнический пропитанный 1,0 *мм*	—	—	1	1,00
	7	Зазор на укладку не менее	—	0,30	—	0,40
		Всего . . .	—	1,94 (2,14)	—	4,22

Лобовая часть	Поз.	Наименование	На 2 стороны	
			число слоев	общая толщина, *мм*
Рис. 2, *б*	8	Лента миткалевая 0,18 *мм* 2 ряда вполнахлеста	8	1,44
	9	Разбухание от пропитки	—	0,42
		Всего	—	1,86

Примечание. Цифры в скобках относятся к случаю двух проводников по ширине паза.

3. Для машин с открытыми пазами до 500 *в*.

Один проводник по ширине. Марка проводника — ПБД

Пазовая часть	Поз.	Наименование	По ширине		По высоте	
			число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*
1, 2, 3, 5	1	Изоляция секции — лакоткань 0,2 *мм* $2^1/_4$ слоя	5	1,00	8	1,60
	2	» » — » 0,2 » $2^1/_4$ »	5	1,00	8	1,60
	3	» » — лента миткалевая 0,15 *мм* 2 ряда впритык	4	0,60	8	1,20
	4	Разбухание ленты миткалевой от пропитки	—	0,20	—	0,40
		Итого	—	2,80	—	4,80
	5	Прокладка между слоями — картон электротехнический 1,0 *мм*	—	—	1	1,00
	6	Зазор на укладку не менее	—	0,20	—	0,40
Рис. 3, *а*		Всего	—	3,00	—	6,20

Лобовая часть	Поз.	Наименование	На 2 стороны	
			число слоев	общая толщина, *мм*
7, 8	7	Изоляция секции — лаколента 0,25 *мм* 1 ряд вполнахлеста	4	1,00
	8	» » — лента миткалевая 0,15 *мм* 1 ряд вполнахлеста	4	0,60
	9	Разбухание от пропитки	—	0,48
Рис. 3, *б*		Всего	—	2,08

4. Для машин с открытыми пазами до 3000 и 6000 *в*.

Один или два проводника по ширине. Марка проводника — ПБД

Пазовая часть	Поз.	Наименование	До 3000 *в*, по ширине: число слоев	До 3000 *в*, по ширине: общая толщина *мм*	До 3000 *в*, по высоте: число слоев	До 3000 *в*, по высоте: общая толщина *мм*	До 6000 *в*, по ширине: число слоев	До 6000 *в*, по ширине: общая толщина *мм*	До 6000 *в*, по высоте: число слоев	До 6000 *в*, по высоте: общая толщина *мм*
Рис. 4, *а*	1	Прокладка* между витками (если больше 20 *в* на виток) — картон электротехнический 0,2 *мм*	—	—	$\left(\frac{1}{2}s_п-1\right)$	$\left(\frac{s_п-2}{10}\right)$	—	—	$\left(\frac{1}{2}s_п-2\right)$	$\left(\frac{s_п-2}{10}\right)$
	2	Изоляция секции — микафолий 0,25 *мм* 5¼ слоев для 3000 *в* и 9¼ слоев для 6000 *в*	11	2,75	20	5,00	19	4,75	36	9,00
	3	Изоляция секции — картон электротехнический повышенного качества 0,15 *мм* 1¼ слоя	2	0,30	6	0,90	2	0,30	6	0,90
	4	Увеличение толщины от проникновения компаунда	—	0,20	—	1,00	—	0,20	—	1,00
		Итого	—	3,25	—	6,90*	—	5,25	—	10,90*
	5	Прокладка на дно паза — картон электротехнический	—	—	1	0,50	—	—	1	0,50
	6	Прокладка между слоями — картон электротехнический	—	—	1	1,70	—	—	1	1,70
	7	Зазор на укладку не менее	—	0,30	—	0,40	—	0,30	—	0,40
		Всего	—	3,55	—	9,50*	—	5,55	—	13,50*

*К размерам изоляции по высоте в пазовой части добавлять $\frac{s_п-2}{10}$ ($s_п$ — число проводников в пазу).

Продолжение

Лобовая часть	Поз.	Наименование	На 2 стороны		На 2 стороны	
			число слоев	общая толщина, *мм*	число слоев	общая толщина, *мм*
	8	Изоляция витков через один (если больше 20 *в* на виток) — микалента 0,13 *мм* 1 ряд вполнахлеста	(4)	(0,52)	(4)	(0,52)
	9	Изоляция секции—лаколента 0,2 *мм* 3 ряда для 3000 *в* и 5 рядов для 6000 *в* вполнахлеста	12	2,40	20	4,00
8, 9, 10 (схема)	10	Изоляция секции — лента тафтяная 0,18 *мм* 1 ряд вполнахлеста	4	0,72	4	0,72
Рис. 4, *б*	11	Разбухание от пропитки	—	0,94 (1,10)	—	1,42 (1,58)
		Всего	—	4,06 (4,74)	—	6,14 (6,82)

5. Для машин с открытыми пазами до 3000 и 6000 *в*.

Непрерывная изоляция секций. Один проводник по ширине. Марка проводника — ПБД

Пазовая часть	Поз.	Наименование	До 3000 *в*				До 6000 *в*			
			по ширине		по высоте		по ширине		по высоте	
			число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*
Рис. 5, *а*	1	Разбухание изоляции проводников от пропитки	—	0,10	—	0,10 $s_п$	—	0,10	—	0,10 $s_п$
	2	Изоляция витков—микалента 0,13 *мм* 1 ряд вполнахлеста	—	0,50	—	0,50 $s_п$	—	0,50	—	0,50 $s_п$
	3	Изоляция секции—микалента 0,13 *мм* 5 рядов для 3000 *в* и 9 рядов для 6000 *в* вполнахлеста	20	3,50	40	7,00	36	5,40	72	10,80
	4	Изоляция секции — лента тафтяная 0,22 *мм* 1 ряд впритык	2	0,44	4	0,88	2	0,44	4	0,88
	5	Разбухание ленты поз. 4 от пропитки	—	0,16	—	0,32	—	0,16	—	0,32
		Итого	—	4,70	—	8,20*	—	6,60	—	12,00*
	6	Прокладка на дно паза — картон электротехнический	—	—	1	0,50	—	—	1	0,50
	7	Прокладка между слоями — картон электротехнический	—	—	1	0,80	—	—	1	0,80
	8	Прокладка под клин — картон электротехнический	—	—	1	0,20	—	—	1	0,20
	9	Зазор на укладку не менее	—	0,20	—	0,10	—	0,20	—	0,10
		Всего	—	4,90	—	9,80*	—	6,80	—	13,60*

* К размерам изоляции по высоте пазовой части добавлять 0,60 $s_п$ ($s_п$ — число проводников в пазу).

Продолжение

Лобовая часть	Поз.	Наименование	На 2 стороны		На 2 стороны	
			число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*
Рис. 5, *б*	10	Изоляция витков—микалента 0,13 *мм* 1 ряд вполнахлеста	—	0,50	—	0,50
	11	Изоляция секции—микалента 0,13 *мм* 4 ряда для 3000 *в* и 8 рядов для 6000 *в* вполнахлеста	16	3,00	32	5,00
	12	Изоляция секции — лента тафтяная 0,22 *мм* 1 ряд вполнахлеста . .	4	0,88	4	0,88
	13	Разбухание ленты поз. 12 от пропитки	—	0,32	—	0,32
	14	Неплотность намотки изоляции и разбухание изоляции проводников от пропитки	—	1,50	—	1,50
		Всего . .	—	6,20	—	8,20

Б. Однослойные катушечные обмотки.

6. Для машин с закрытыми и полузакрытыми пазами до 500 *в*. Обмотка по способу прошивания. Марка проводника—ПБОО

Пазовая часть	Поз.	Наименование	По ширине		По высоте	
			число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*
Рис. 6, *а*	1	Изоляция паза — картон электротехнический 0,2 *мм* $6^1/_4$ слоев	12	2,40	13	2,60
	2	Изоляция паза — лакоткань 0,3 *мм* $1^1/_4$ слоя	2	0,60	3	0,90
		Итого . . .	—	3,00	—	3,50
	3	Зазор на укладку не менее	—	0,35	—	0,35
		Всего . . .	—	3,35	—	3,85

Лобовая часть	Поз.	Наименование	На 2 стороны	
			число слоев	общая толщина *мм*
Рис. 6, *б*	4	Изоляция катушки — лента тафтяная 0,18 *мм* 1 ряд вполнахлеста .	4	0,72
	5	» катушечной группы — лента тафтяная 0,18 *мм* 1 ряд вполнахлеста	4	0,72
		Всего . . .	—	1,44

Примечание. Расстояние от изолированиой обмотки до корпуса не менее 15 *мм*; расстояние между изолированными фазами не менее 10 *мм*.

7. Для машин с закрытыми и полузакрытыми пазами до 3000 и 6000 *в*. Обмотка по способу прошивания. Марка проводника — ПБОО

Пазовая часть	Поз.	Наименование	До 3000 *в*				До 6000 *в*			
			по ширине		по высоте		по ширине		по высоте	
			число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*
Рис. 7, *а*	1	Изоляция паза — микафолий 0,35 *мм* $5^1/_4$ слоев для 3000 *в* и $9^1/_4$ слоев для 6000 *в*	10	3,50	11	3,85	18	6,30	19	6,65
	2	Изоляция паза — картон электротехнический повышенного качества 0,15 *мм* $1^1/_4$ слоя	2	0,30	3	0,45	2	0,30	3	0,45
		Итого	—	3,80	—	4,30	—	6,60	—	7,10
	3	Зазор на укладку не менее	—	0,35	—	0,35	—	0,35	—	0,35
		Всего	—	4,15	—	4,65	—	6,95	—	7,45

Продолжение

Лобовая часть	Поз.	Наименование	На 2 стороны		На 2 стороны	
			число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*
Рис. 7, *б*.	4	Изоляция катушки — лаколента 0,2 *мм* 1 ряд для 3000 *в* и 2 ряда для 6000 *в* вполнахлеста	4	0,80	8	1,60
	5	Изоляция катушки — лента тафтяная 0,18 *мм* 1 ряд вполнахлеста	4	0,72	4	0,72
	6	Зазор между изолированными катушками	—	—	—	(5,00)
	7	Изоляция группы катушек — лента тафтяная 0,18 *мм* 1 ряд вполнахлеста . . .	4	0,72	4	0,72
		Всего . . .	—	2,24	—	3,04

Примечание. Расстояние между изолированной обмоткой н. корпусом до 3000 *в* — не менее 30 *мм*, до 6000 *в* — не менее 40 *мм*; расстояние между изолированными фазами до 3000 *в* — не менее 20 *мм*, до 6000 *в* — не менее 30 *мм*.

В. Роторные обмотки

8. Стержневые обмотки до 300 *в* и от 300 до 500 *в*

Пазовая часть	Поз.	Наименование	До 300 *в* по ширине, число слоев	До 300 *в* по ширине, общая толщина, *мм*	До 300 *в* по высоте, число слоев	До 300 *в* по высоте, общая толщина, *мм*	От 300 до 500 *в* по ширине, число слоев	От 300 до 500 *в* по ширине, общая толщина, *мм*	От 300 до 500 *в* по высоте, число слоев	От 300 до 500 *в* по высоте, общая толщина, *мм*
Рис. 8, *а*	1	Изоляция стержия—бумага телефонная лакированная 0,07 *мм* 6 слоев до 300 *в* и 10 слоев до 500 *в*	12	0,84	24	1,68	20	1,40	40	2,80
	2	Изоляция паза — картон электротехнический 0,2 *мм* 1¼ слоя	2	0,40	3	0,60	2	0,40	3	0,60
	3	Прокладка между слоями — картон электротехнический пропитанный	—	—	1	0,50	—	—	1	0,50
		Итого	—	1,24	—	2,78	—	1,80	—	3,90
	4	Зазор на укладку не менее	—	0,30	—	1,00	—	0,30	—	1,00
		Всего	—	1,54	—	3,78	—	2,10	—	4,90

Лобовая часть	Поз.	Наименование	До 300 *в*, на 2 стороны, число слоев	До 300 *в*, на 2 стороны, общая толщина, *мм*	От 300 до 500 *в*, на 2 стороны, число слоев	От 300 до 500 *в*, на 2 стороны, общая толщина, *мм*
Рис. 8, *б*	5	Изоляция стержня — лаколента 0,2 *мм* 1 ряд вполнахлеста	—	—	4	0,80
	6	Изоляция стержня — лента тафтяная 0,18 *мм* 1 ряд вполнахлеста	4	0,72	4	0,72
		Всего	—	0,72	—	1,52

9. Стержневые обмотки от 500 до 750 *в*, от 750 до 1000 *в* и от 1000 до 1500 *в*

Пазовая часть	Поз.	Наименование	От 500 до 750 *в*				От 750 до 1000 *в*				От 1000 до 1500 *в*			
			по ширине		по высоте		по ширине		по высоте		по ширине		по высоте	
			число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*
Рис. 9, *а*	1	Изоляция стержня — микалента 0,13 *мм* 1 ряд от 500 до 1000 *в* и 2 ряда от 1000 до 1500 *в*	4	0,52	8	1,04	4	0,52	8	1,04	8	1,04	16	2,0
	2	Изоляция стержня — микафолий 0,2 *мм* 2¼ слоя от 500 до 750 *в*, 3¼ слоя от 750 до 1000 *в* и 4¼ слоя от 1000 до 1500 *в*	4	0,80	10	2,00	6	1,20	14	2,80	8	1,60	18	3,60
	3	Изоляция стержня — картон электротехнический 0,15 *мм* 1¼ слоя	2	0,30	6	0,90	2	0,30	6	0,90	2	0,30	6	0,90
	4	Изоляция паза—картон электротехнический 0,2 *мм* 1¼ слоя	2	0,40	3	0,60	2	0,40	3	0,60	2	0,40	3	0,60
		Итого	—	2,02	—	4,54	—	2,42	—	5,34	—	3,34	—	7,18

Продолжение

Пазовая часть	Поз.	Наименование	От 500 до 750 *в*				От 750 до 1000 *в*				От 1000 до 1500 *в*			
			по ширине		по высоте		по ширине		по высоте		по ширине		по высоте	
			число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*
	5	Прокладка между слоями—картон электротехнический пропитанный	—	—	1	0,50	—	—	1	0,50	—	—	1	0,50
	6	Зазор на укладку не менее . . .	—	0,30	—	1,00	—	0,30	—	1,00	—	0,30	—	1,00
		Всего . . .	—	2,32	—	6,04	—	2,72	—	6,84	—	3,64	—	8,68

Лобовая часть	Поз.	Наименование	На 2 стороны		На 2 стороны		На 2 своровы	
			число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщина *мм*	число слоев	общая толщана *мм*
Рис. 9, *б*	7	Изоляция стержня — микалента 0,13 *мм* 1 ряд от 500 до 750 *в*, 2 ряда от 750 до 1000 *в* и 3 ряда от 1000 до 1500 *в* вполнахлеста . .	4	0,52	8	1,04	12	1,56
	8	Изоляция стержня — лента тафтяная 0,18 *мм* 1 ряд вполнахлеста . .	4	0,72	4	0,72	4	0,72
		Всего .	—	1,24	—	1,76	—	2,28

Рекомендуемые плотности тока в обмотке статора и линейные нагрузки

δa, а/мм²

Плотность тока

Исключительно сильно вентилируемые

Нормально вентилируемые

Закрытые с обдуваемой поверхностью

Закрытые невентилируемые

0 1 2 3 4 5 6 7 8

0,1 0,2 0,4 0,6 1 2 4 6 10 20 40 60 100 200 400 600 1000

Полезная мощность P_2, квт

A, а/см

Линейная нагрузка

Исключительно сильно вентилируемые

Нормально вентилируемые до 500 в

» » » 3000 в

» 6000 в

Закрытые с обдув. поверхностью

» невентилируемые

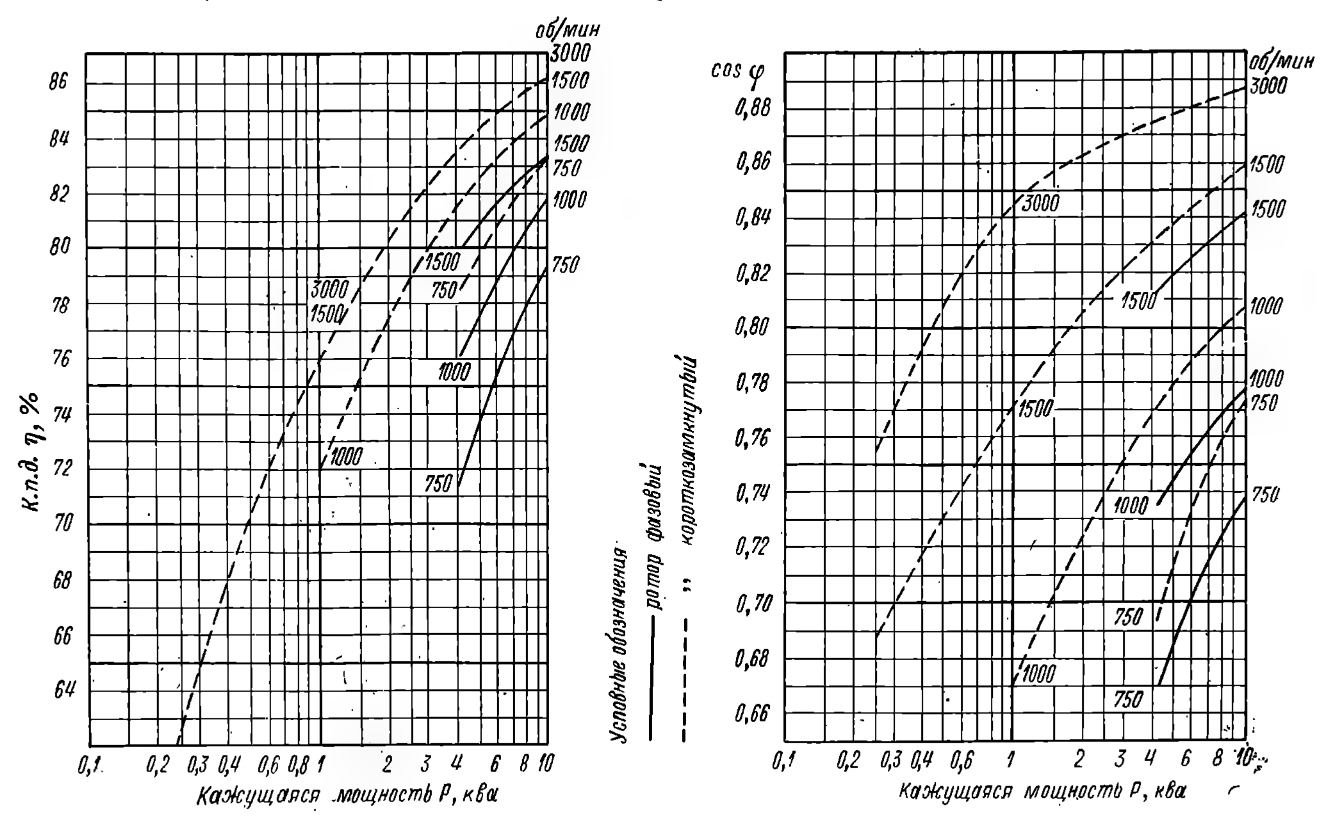
0 100 200 300 400 500

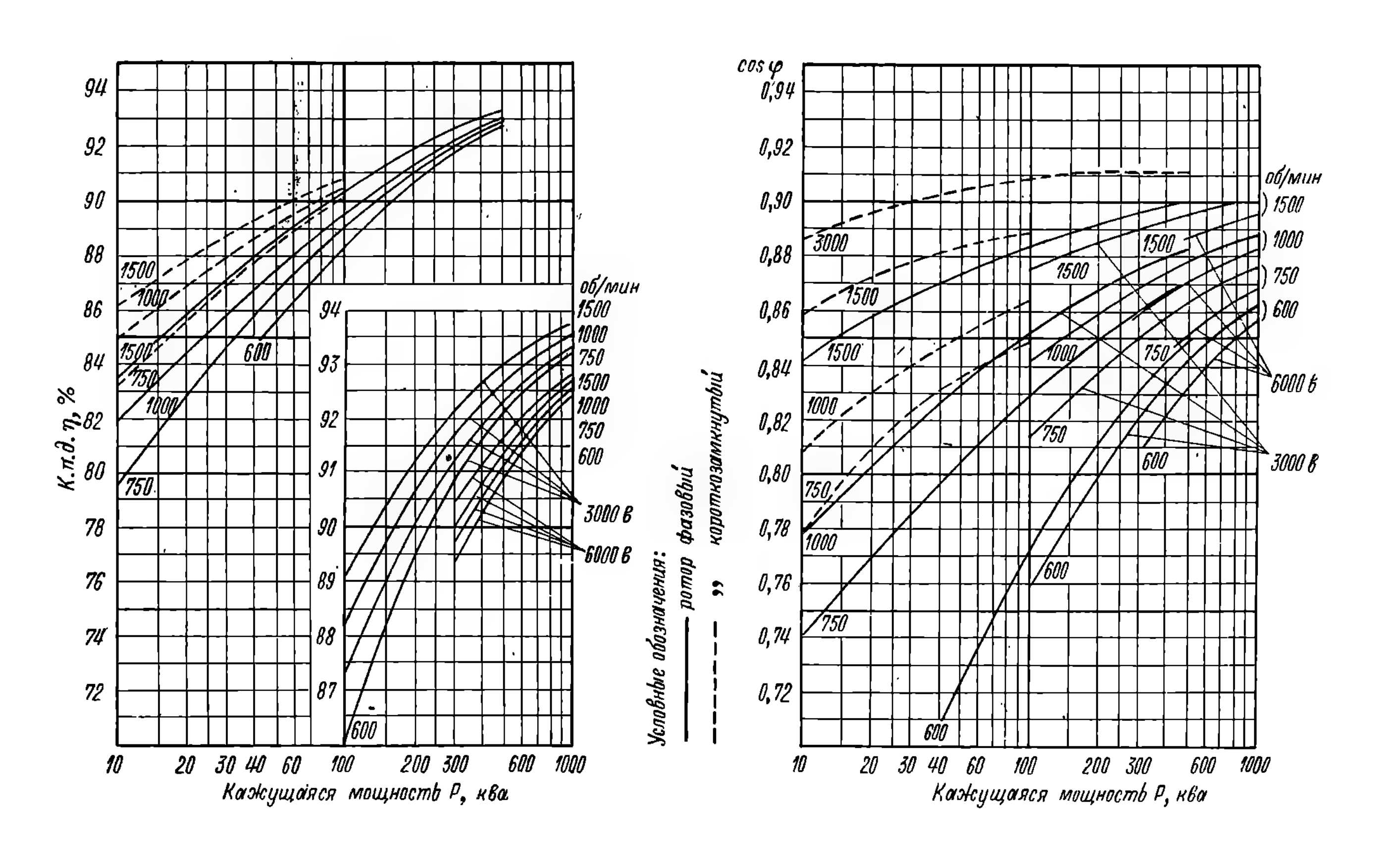
0,1 0,2 0,4 0,6 1 2 4 6 10 20 40 60 100 200 400 600 1000

Полезная мощность P_2, квт

Зависимость экономических показателей асинхронных двигателей от кажущейся мощности

(Составлено на основании действующих стандартов на асинхронные двигатели)




К.п.д. η, %
об/мин
1500
1000
750
1500
1000
750
600
3000 в
6000 в
Кажущаяся мощность P, ква
Условные обозначения:
ротор фазовый
" короткозамкнутый
cos φ
об/мин
1500
1000
750
600
6000 в
3000 в
Кажущаяся мощность P, ква

Номинальные данные асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором всесоюзных единых серий А и АО

Тип	Мощность *квт*	Ток [*а*] при напряжении				К. п. д. %	cos φ	*n* *об/мин*
		127 *в*	220 *в*	380 *в*	500 *в*			
А-31-2	1,0	6,6	3,8	2,2	1,7	79,0	0,86	2850
А-32-2	1,7	11,1	6,4	3,7	2,8	81,5	0,87	2850
А-41-2	2,8	17,3	10,0	5,8	4,4	84,0	0,88	2870
А-42-2	4,5	27,0	15,7	9,1	6,8	85,5	0,88	2870
А-51-2	7,0	41,0	24,0	13,8	10,5	87,0	0,89	2890
А-52-2	10,0	58,5	33,8	19,5	15,0	87,5	0,89	2890
А-61-2	14	—	47,0	27,5	21,0	87,5	0,89	2920
А-62-2	20	—	66,0	38,0	29,0	88,5	0,90	2920
А-71-2	28	—	92,0	53,0	40,5	89,0	0,90	2930
А-72-2	40	—	128,0	74,0	56,0	90,0	0,91	2930
А-81-2	55	—	175,0	101,0	77,0	90,5	0,91	2930
А-82-2	75	—	235,0	136,0	104,0	91,0	0,92	2930
А-91-2	100	—	312,0	180,0	137,0	91,5	0,92	2950
А-92-2	125	—	388,0	225,0	171,0	92,0	0,92	2950
А-31-4	0,6	4,8	2,8	1,6	1,2	74,0	0,76	1410
А-32-4	1,0	7,3	4,2	2,4	1,9	78,5	0,79	1410
А-41-4	1,7	11,6	6,7	3,9	2,9	81,5	0,82	1420
А-42-4	2,8	18,2	10,5	6,1	4,6	83,5	0,84	1420
А-51-4	4,5	28,2	16,3	9,4	7,2	85,5	0,85	1440
А-52-4	7,0	42,6	24,6	14,2	10,8	87,0	0,86	1440
А-61-4	10,0	—	34,1	19,7	15,0	87,5	0,88	1450
А-62-4	14	—	47,5	27,5	20,8	88,5	0,88	1450
А-71-4	20	—	67,0	39,0	29,6	89,0	0,88	1450
А-72-4	28	—	93,0	54,0	41,0	90,0	0,88	1450
А-81-4	40	—	131,0	76,0	57,5	90,5	0,89	1460
А-82-4	55	—	178,0	103,0	78,5	91,0	0,89	1460
А-91-4	75	—	242,0	140,0	106,0	91,5	0,89	1460
А-92-4	100	—	320,0	185,0	141,0	92,0	0,89	1460
А-31-6	0,4	3,9	2,25	1,3	1,0	70,0	0,67	930
А-32-6	0,6	5,35	3,1	1,8	1,35	74,0	0,69	930
А-41-6	1,0	8,2	4,8	2,8	2,1	77,0	0,72	930
А-42-6	1,7	13,0	7,5	4,3	3,3	79,5	0,75	930
А-51-6	2,8	19,7	11,4	6,6	5,0	82,5	0,78	950
А-52-6	4,5	30,3	17,5	10,1	7,7	84,5	0,80	950
А-61-6	7,0	—	27,0	15,5	12,0	86,0	0,81	970
А-62-6	10,0	—	37,0	21,5	16,5	86,5	0,82	970
А-71-6	14	—	51,0	29,6	22,4	87,0	0,83	970
А-72-6	20	—	71,3	41,3	31,4	88,0	0,84	970
А-81-6	28	—	97,5	56,5	43,0	89,0	0,85	975
А-82-6	40	—	136,0	79,8	59,8	90,0	0,86	975
А-91-6	55	—	183,0	106,0	80,0	91,0	0,87	980
А-92-6	75	—	243,0	141,0	107,0	92,0	0,88	980
А-61-8	4,5	—	18,0	11,0	8,5	83,5	0,76	730
А-62-8	7,0	—	28,0	16,0	12,0	85,0	0,78	730
А-71-8	10,0	—	38,0	22,0	16,5	85,0	0,80	730
А-72-8	14	—	52,0	30,0	23,0	87,0	0,81	730
А-81-8	20	—	73,0	42,0	32,0	88,0	0,82	730
А-82-8	28	—	100,0	58,0	44,0	88,0	0,83	730

Тип	Мощность *квт*	Ток [*а*] при напряжении				К.п.д. %	cos φ	*n* *об/мин*
		127 *в*	220 *в*	380 *в*	500 *в*			
А-91-8	40	—	139,0	81,0	61,0	90,0	0,84	730
А-92-8	55	—	188,0	109,0	83,0	91,0	0,84	730
АО-31-2	0,6	4,2	2,4	1,4	1,1	76,0	0,85	2860
АО-32-2	1,0	6,6	3,8	2,2	1,7	79,0	0,86	2860
АО-41-2	1,7	10,7	6,2	3,6	2,8	81,5	0,87	2880
АО-42-2	2,8	17,3	10,0	5,8	4,4	84,0	0,88	2880
АО-51-2	4,5	27,0	15,6	9,1	6,9	85,5	0,88	2900
АО-52-2	7,0	41,0	24,0	13,8	10,5	87,0	0,89	2900
АО-62-2	10,0	—	34,0	19,5	15,0	87,5	0,89	2930
АО-63-2	14	—	46,5	27,0	20,5	88,0	0,90	2930
АО-72-2	20	—	66,0	38,0	29,0	88,5	0,90	2940
АО-73-2	28	—	90,0	52,0	39,5	89,5	0,91	2940
АО-82-2	40	—	129,0	75,0	57,0	89,5	0,91	2950
АО-83-2	55	—	174,0	100,0	77,0	90,0	0,92	2950
АО-93-2	75	—	236,0	136,0	104,0	90,5	0,92	2960
АО-94-2	100	—	314,0	182,0	138,0	91,0	0,92	2960
АО-31-4	0,6	4,8	2,8	1,6	1,2	74,0	0,76	1410
АО-32-4	1,0	7,3	4,2	2,4	1,9	78,5	0,79	1410
АО-41-4	1,7	11,6	6,7	3,9	2,9	81,5	0,82	1420
АО-42-4	2,8	18,2	10,5	6,1	4,6	83,5	0,84	1420
АО-51-4	4,5	28,2	16,3	9,4	7,2	85,5	0,85	1440
АО-52-4	7,0	42,6	24,6	14,2	10,8	87,0	0,86	1440
АО-62-4	10,0	—	34,1	19,7	15,0	87,5	0,88	1460
АО-63-4	14	—	47,2	27,4	20,8	88,5	0,88	1460
АО-72-4	20	—	67,0	38,8	29,5	89,0	0,88	1460
АО-73-4	28	—	93,0	53,8	41,0	90,0	0,89	1460
АО-82-4	40	—	130,0	75,0	57,5	90,5	0,89	1470
АО-83-4	55	—	178,0	103,0	78,5	91,0	0,89	1470
АО-93-4	75	—	239,9	138,0	105,0	91,5	0,90	1470
АО-94-4	100	—	318,0	184,0	139,0	92,0	0,90	1470
АО-31-6	0,4	3,9	2,25	1,3	1,0	70,0	0,67	930
АО-32-6	0,6	5,35	3,1	1,8	1,35	74,0	0,69	930
АО-41-6	1,0	8,2	4,8	2,8	2,1	77,0	0,72	930
АО-42-6	1,7	13,0	7,5	4,3	3,3	79,5	0,75	930
АО-51-6	2,8	19,7	11,4	6,6	5,0	82,5	0,78	950
АО-52-6	4,5	30,3	17,5	10,1	7,7	84,5	0,80	950
АО-62-6	7,0	—	27,0	15,5	12,0	86,0	0,81	980
АО-63-6	10,0	—	36,5	21,0	16,0	87,0	0,82	980
АО-72-6	14	—	50,5	29,0	22,1	88,0	0,83	980
АО-73-6	20	—	70,5	41,0	31,0	88,5	0,84	980
АО-82-6	28	—	96,0	55,5	42,5	89,0	0,86	980
АО-83-6	40	—	134,0	77,5	59,0	90,0	0,87	980
АО-93-6	55	—	181,0	104,0	79,5	91,0	0,88	985
АО-94-6	75	—	240,0	139,0	106,0	92,0	0,89	985
АО-62-8	4,5	—	18,5	10,5	8,5	84,5	0,76	735
АО-63-8	7,0	—	27,5	16,0	12,0	86,0	0,78	735
АО-72-8	10,0	—	38,0	22,0	16,5	87,0	0,80	735
АО-73-8	14	—	52,0	30,0	23,0	87,5	0,81	735
АО-82-8	20	—	72,5	42,0	32,0	88,0	0,82	735
АО-83-8	28	—	99,5	57,5	44,0	89,0	0,83	735
АО-93-8	40	—	139,0	80,0	61,0	90,0	0,84	735
АО-94-8	55	—	187,0	108,0	82,0	91,0	0,84	735

ПРИЛОЖЕНИЕ X

(Наименование предприятия)	РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ типа ---- № ---- Завод-изготовитель *неизвестен.* Заказ № *1234* Заказчик *Лесопильный завод №1.* Исполнение *защищенный от капель, с вентиляцией*	Расчетный формуляр № *890* Лист *1* Всего *1* л.

Номинальные данные	Киловатт	Вольт	Ампер	Об/мин	Герц	Режим работы	Ротор, вольт	Ротор, ампер
До перемотки	—	—	—	—	—	—	—	—
После перемотки	*6,8*	*220/380*	*25,6/14,8*	*1460*	*50*	*Продолжит.*	*Короткозамкнут.*	

I. Обмер сердечника статора					II. Обработка обмера сердечника			
1	Диаметр наружный	$D_н$	*24,5*	см	11	Число пар полюсов	p	*2*	–
2	» внутренний	D	*16,0*	»	12	Полюсное деление	τ	*12,6*	см
3	Длина полная	$l_п$	*15,0*	»	13	Длина расчетная	l	*14,0*	»
4	Число пазов общее	Z	*36*	–	14	Площадь полюса	$Q_в$	*176,0*	см²
5	Толщина листов	Δ	*0,5*	мм	15	Коэфф. заполн. стали	$k_о$	*0,93*	–
6	Изоляция »	–	*лак*	–	16	Длина стали чистая	$l_о$	*13,0*	см
7	Поперечные и продольные каналы: число	$n_к$	*1*	–	17	Высота тела статора	$h_с$	*1,95*	»
8	ширина	$b_к$	*1,0*	см	18	Сечение » »	$Q_с$	*25,4*	см²
9	ч. рядов	$m_к$	—	–	19	Ширина зубца расч.	$b_з$	*0,55*	см
10	диаметр	$d_к$	—	см	20	Сечение зубцов	$Q_з$	*64,4*	см²

III. Эскиз паза статора

12,3; *1,0*; *23,0*; *5,5*; *4,7*; *1,1*

21 Площадь паза $q_п$ = *223,6* мм²

IV. Данные обмотки статора			
22	Тип обмотки		*цепная*
23	Число пазов на п и ф	q	*3*
24	Шаг из 1-го паза в *10*	y	*9*
25	Обмоточный коэфф.	k	*0,960*
26	Число парал. ветвей	a	*1*
27	Схема или таблица	№	*43*

V. Выбор числа витков в фазе. Выбранное число витков обвести					
28	Числа проводников в пазу (пробы) S_n	*22*	*23*	*24*	
29	» витков в фазе $w = S_n \times 6 =$	*(132)*	*138*	*144*	
30	Магнитный поток $\Phi = 10^8 : w$	*0,758*	*0,725*	*0,695*	*.10⁶*
31	Индукция в зазоре $B_в = \Phi : 112$	*6770*	*6470*	*6210*	
32	» в зубцах $B_з = \Phi : 41$	*18500*	*17700*	*16950*	
33	» в теле ст. $B_с = \Phi : 50,8$	*14900*	*14300*	*13700*	

VI. Обмотка из мягких секций					VIII. Общие данные			
34	Марка проводника	–	*ПЭЛБО*	–	59	Средняя длина витка	$l_в$	*79,8*	см
35	Коэфф. заполн. паза	$f_п$	*0,43*	–	60	Общее сечение меди	$a'q$	*3,30*	мм²
36	Число парал. сечений	a'	*2*	–	61	Вес меди без изоляц.	G	*9,28*	кг
37	Сечение пров. с изол.	q'	*2,17*	мм²	62	» » с »	G'	*9,82*	»
38	» » без »	q	*1,651*	»	63	Сопротивление при 15°С	r	*0,548*	ом
39	Диаметр » с »	d'	*1,66*	мм	64	Плотность тока	S_a	*4,5*	а/мм²
40	» » без »	d	*1,45*	»	65	Ток в проводнике	I_a	*14,8*	а
41	Средн. ширина секции	T	*14,4*	см	66	Линейная нагрузка	A	*233*	а/см
42	Коэффициент длины	K	*1,50*	–	67	Кажущаяся мощность	P	*9,75*	ква
43	Постоянное слагаемое	L	*3,3*	см	68	Коэфф. мощности	$\cos\varphi$	*0,84*	–
44	Длина лобовой части	$l_л$	*24,9*	»	69	» полезн. действия	η	*83,0*	%

X. Эскиз изоляции

Изоляция пазо-нормальная для всыпной обмотки чот 4А371

VII. Обмотка из жестких секций				
45	Число парал. сечений	a'		–
46	Ширина меди с изол.	B		мм
47	Высота » » »	H		»
48	Длина прямой части	M		см
49	Радиус закр. головки	R		»
50	Зазор в наклон. части	Δ_2		мм
51	Расстояния между осями сечений секций	$f_с$		»
52		$t_с$		»
53	Отношение расстояний	$f_с : t_с$		–
54	Коэффициент длины	K_1		–
55	» вылета	K_2		–
56	Средн. ширина секции	T		см
57	Длина лобовой части	$l_л$		»
58	Вылет » »	S		»

IX. Проверка укладки обмотки

	Поз.	По ширине	По высоте
Пазовая часть			
Лобовая часть			

Примечания: *После сборки произвести испытание на нагревание для проверки расчета*

Рассчитал: (Подпись) 19 *12/VII 55*	Проверил: (Подпись) 19 *13/VII 55*	Обмоточная записка № *567* 19 *12/VII 55*

Продолжение

(Наименование предприятия)	РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТИПА *ТА 39/30-8* № *12345* ЗАВОД-ИЗГОТОВИТЕЛЬ *—* ЗАКАЗ № *987* ЗАКАЗЧИК *Городской водопровод* ИСПОЛНЕНИЕ: *защищенный с вентиляцией*	РАСЧЕТНЫЙ ФОРМУЛЯР № *321* ЛИСТ *1* ВСЕГО *1* Л.

НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ:	КИЛОВАТТ	ВОЛЬТ	АМПЕР	ОБ/МИН	ГЕРЦ	РЕЖИМ РАБОТЫ	РОТОР. ВОЛЬТ	РОТОР. АМПЕР
ДО ПЕРЕМОТКИ	85	500	129	730	50	Продолжит.	250	218
ПОСЛЕ ПЕРЕМОТКИ	115	220/380	374/216	975	50	Продолжит.	330	215

I. ОБМЕР СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА.

1	Диаметр наружный	$D_н$	56,0	см
2	внутренний	D	39,0	"
3	Длина полная	$l_п$	30,0	"
4	Число пазов общее	Z	72	–
5	Толщина листов	Δ	0,5	мм
6	Изоляция	–	лак	–
7	Поперечные и продольные каналы: число	$n_к$	5	–
8	ширина	$b_к$	0,6	см
9	ч. рядов	$m_к$	—	–
10	диаметр	$d_к$	—	см

II. ОБРАБОТКА ОБМЕРА СЕРДЕЧНИКА

11	Число пар полюсов	p	3	–
12	Полюсное деление	τ	20,4	см
13	Длина расчетная	l	27,0	"
14	Площадь полюса	$Q_в$	551,0	см²
15	Коэфф. заполн. стали	k_o	0,93	–
16	Длина стали чистая	l_o	25,1	см
17	Высота тела статора	h_c	4,74	"
18	Сечение " "	Q_c	119,0	см²
19	Ширина зубца расч.	$b_з$	1,08	см
20	Сечение зубцов	$Q_з$	326,0	см²

III. ЭСКИЗ ПАЗА СТАТОРА.

13,0
7,3
37,6
33,5
10,8
9,7

21. Площадь паза $q_п$ = — мм²

IV. ДАННЫЕ ОБМОТКИ СТАТОРА.

22	Тип обмотки *двухслойная*		
23	Число пазов на п. и ф.	q	4
24	Шаг из 1^{го} паза в 11.	y	10
25	Обмоточный коэфф.	k	0,925
26	Число парал. ветвей	a	3
27	Схема или таблица	№	64

V. ВЫБОР ЧИСЛА ВИТКОВ В ФАЗЕ. ВЫБРАННОЕ ЧИСЛО ВИТКОВ ОБВЕСТИ.

28	Числа проводников в пазу (пробы) S_n		6	8	10	
29	" витков в фазе	$w=S_n\times4=$	24	(32)	40	
30	Магнитный поток	$Ф=1{,}04\cdot10^8:w$	4,34	3,26	2,60	$\cdot10^6$
31	Индукция в зазоре	$B_в=Ф:351$	12350	9280	7400	
32	" в зубцах	$B_з=Ф:208$	20900	15650	12500	
33	" в теле ст.	$B_c=Ф:238$	18200	13700	10900	

VI. ОБМОТКА ИЗ МЯГКИХ СЕКЦИЙ.

34	Марка проводника	–		–
35	Коэфф. заполн. паза	$f_п$		–
36	Число парал. сечений	a'		–
37	Сечение пров. с изол.	q'		мм²
38	" " без "	q		"
39	Диаметр " с	d'		мм
40	" " без	d		"
41	Средн. ширина секции	T		см
42	Коэффициент длины	K		–
43	Постоянное слагаемое	L		см
44	Длина лобовой части	$l_л$		"

VIII. ОБЩИЕ ДАННЫЕ.

59	Средняя длина витка	$l_в$	134,4	см
60	Общее сечение меди	$a'q$	16,2	мм²
61	Вес меди без изоляц.	G	55,7	кг
62	" " с "	G'	58,0	"
63	Сопротивление при 15°С	r	0,0155	ом
64	Плотность тока	S_a	4,45	а/мм²
65	Ток в проводнике	I_a	72	а
66	Линейная нагрузка	A	335	а/см
67	Кажущаяся мощность	P	142	ква
68	Коэфф. мощности	$\cos\varphi$	0,88	–
69	" полезн. действия	η	92,0	%

X. ЭСКИЗ ИЗОЛЯЦИИ

1
2
3,4
5
9

VII. ОБМОТКА ИЗ ЖЕСТКИХ СЕКЦИЙ

45	Число парал. сечений	a'	1	–
46	Ширина меди с изол.	B	5,43	мм
47	Высота " " "	H	14,4	"
48	Длина прямой части	M	2,5	см
49	Радиус закр. головки	R	1,2	"
50	Зазор в наклон. части	Δ_2	4,5	мм
51	Расстояния между осями сечений секций	f_c	11,8	"
52		t_c	17,0	"
53	Отношение расстояний	$f_c:t_c$	0,69	—
54	Коэффициент длины	K_1	1,40	—
55	" вылета	K_2	0,48	—
56	Средн. ширина секции	T	18,7	см
57	Длина лобовой части	$l_л$	37,22	"
58	Вылет " "	S	14,1	"

IX. ПРОВЕРКА УКЛАДКИ ОБМОТКИ

		Поз.	По ширине	По высоте
Пазовая часть	Лента миткалевая 1 ряд в ½ нахл.	1	4.0,15=0,60	8.0,15=1,20
	Лакоткань 1¼ слоя	2	2.0,20=0,40	3.0,20=0,60
	Картон эл.-техн. пропит. 1¼ сл.	3	2.0,20=0,40	3.0,20=0,60
	Разбухание от пропитки	4	0,12	0,18
	Картон эл.-техн.	5	—	1,00
	Зазор на укладку	6	0,30	0,40
	Изоляция проводника ПБД	7	1.0,33=0,33	8.0,33=2,64
	Медь проводника	8	1.5,10=5,10	8.3,28=26,24
	Картон эл.-техн.	9	—	По месту
	Итого		7,25	32,86
Лобовая часть				
	Лента тафтяная 2 ряда в ½ н.	10	8.0,18=1,44	
	Разбухание от пропитки	11	0,42	
	Итого		1,86	

ПРИМЕЧАНИЯ:

РАССЧИТАЛ: (Подпись) 19 10/III 55	ПРОВЕРИЛ: (Подпись) 19 11/III 55	ОБМОТОЧНАЯ ЗАПИСКА № 654 19 11/III 55

Образцы заполненных бланков обмоточных записок

(Наименование) предприятия	Обмотки статора и ротора асинхронного двигателя типа______ №______ Завод-изготовитель *неизвестен* Заказ № *1234* Заказчик *Лесопильный завод № 1* Исполнение — *защищенный от капель, с вентиляцией*	Обмоточная записка № *567* Лист *1* / Всего *1* л

Номинальные данные:	Киловатт	Вольт	Ампер	Об/мин.	Герц	Режим	Ротор: вольт	Ротор: ампер
до перемотки	—	—	—	—	—	—	—	—
после перемотки	*6,8*	*220/380*	*25,6/14,8*	*1460*	*50*	*Продолжит.*	*Короткозамкнутый*	

	Наименование	А. Статор	Б. Ротор	Примечания:
1	Тип обмотки	*Цепная*		
2	Число пазов общее	*36*		
3	« » на полюс и фазу	*3*		
4	Шаг обмотки	*9 (из 1 паза в 10)*		
5	Число параллельных ветвей	*1*		
6	Сопряжение фаз	△/⅄		
7	Схема или таблица обмотки №	*43*		
8	Число секций общее	*18*		
9	» витков в секции	*22*		
10	Форма сечения проводника	*Круглая*		
11	Марка проводника	*ПЭЛБО*		
12	Размер меди голой	*∅ 1,45*		
13	» » с изоляцией	*∅ 1,66*		
14	Число параллельных сечений	*2*		
15	Длина витка средняя, *мм*	*798*		
16	Вес меди с изоляцией, *кг*	*9,82*		
17	Сопротивление фазы при 15° С, *ом*	*0,548*		
18	Изоляция секций по черт. №	*4А371*		

Рассчитал: *(подпись)* *12/VII 1955 г.*	Проверил: *(подпись) 13/VII 1955 г.*	На основании формуляра № *890 12/VII 1955 г.*

(Наименование предприятия)	Обмотки статора и ротора асинхронного двигателя типа *ТА 39/30-8* № *12345* Завод-изготовитель ——— Заказ № *987* Заказчик *Городской водопровод* Исполнение ——— *защищенный с вентиляцией*	Обмоточная записка № *654* Лист *1* Всего *1* л.

Номинальные данные:	Киловатт	Вольт	Ампер	Об/мин	Герц	Режим	Ротор: вольт	Ротор: ампер
до перемотки	*85*	*500*	*129*	*730*	*50*	*Продолжит.*	*250*	*218*
после перемотки	*115.*	*220/380*	*374/216*	*975*	*50*	*Продолжит.*	*330*	*215*

	Наименование	А. Статор	Б. Ротор	Примечание.
1	Тип обмотки	*Двухслойная*	*Двухслойная*	*А 18. Вместо ленты тафтяной 0,18 мм секции изолировать лентой миткалевой 0,15 мм*
2	Число пазов общее	*72*	*63*	
3	» » на полюс и фазу	*4*	$3\frac{1}{2}$	
4	Шаг обмотки	*10 (из 1 паза в 11)*	*10 (из 1 паза в 11)*	
5	Число параллельных ветвей	*3*	*1*	
6	Сопряжение фаз	Δ/⅄	⅄	
7	Схема или таблица обмотки №	*64*	*635*	
8	Число секций общее	*72*	*63 × 2*	
9	» витков в секции	*4*	*1*	
10	Форма сечения проводника	*Прямоугольная*	*Прямоугольная*	
11	Марка проводника	*ПБД*	*Голый*	
12	Размер меди голой	*3,28 × 5,10*	*4,1 × 13,5*	
13	» » с изоляцией	*3,61 × 5,43*	—	
14	Число параллельных сечений	*1*	*1*	
15	Длина витка средняя, *мм*	*1344*	*1280*	
16	Вес меди с изоляцией, *кг*	*58,0*	*40,0*	
17	Сопротивление фазы при 15° С, *ом*	*0,0155*	*0,0086*	
18	Изоляция секций по черт. №	*4А256*	*4А362*	

Рассчитал: *(подпись)* *10/III 1955 г.*	Проверил: *(подпись)* *11/III 1955 г.*	На основании фомуляра № *321 11/III 1955 г.*

СОДЕРЖАНИЕ

Приложения

Цена 5 р. 65 к.